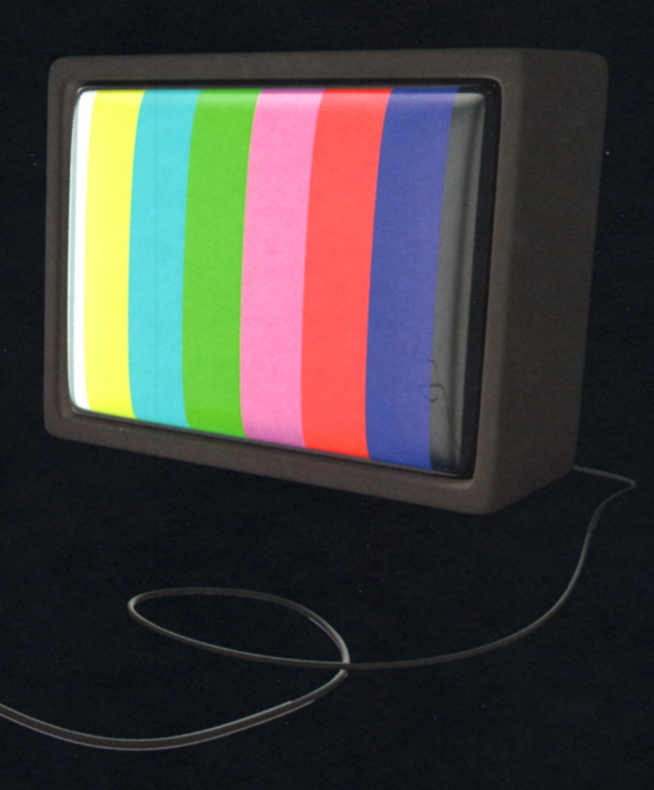
EL PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE

HEISENBERG

¿Existe el mundo cuando no lo miras?





WERNER HEISENBERG fue, durante unos años, uno de los hombres más temidos de Occidente. No en vano lideraba el programa nuclear nazi, a la postre fallido. Su colaboración con este régimen criminal iba a ensombrecer un legado extraordinario en lo científico: en 1925, había formulado el marco teórico que encauzaba el furioso raudal de hallazgos cuánticos de las décadas anteriores y, dos años después, postulaba su célebre principio de incertidumbre. En un sentido crucial, afirmó Heisenberg, el observador influye en la realidad que está observando. Este principio y sus consecuencias dejaron perplejo a más de uno, entre ellos a Einstein, que escribió a modo de protesta: «Me gusta creer que la Luna sigue ahí aunque no la esté mirando».

EL PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE

HEISENBERG

¿Existe el mundo cuando no lo miras?



JESÚS NAVARRO FAUS es profesor de investigación en el Instituto de Física Corpuscular de la Universitat de Valencia-CSIC. Ha publicado numerosos libros de divulgación científica entre los que se cuentan biografías de referencia en castellano de figuras como Erwin Schrödinger y Richard Feynman.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: Luz de la Mora

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: AIP Niels Bohr Library, Franck Collection, Nueva York: 85ai; American Institute of Physics: 37b, 61bd, 113ad; Archivo privado de la familia Heisenberg: 37a, 166; Archivo RBA: 25, 30, 99, 105a, 124; Editorial William Kimber: 149a, 149b; Getty Images: 113b; Gerhard Gronefeld: 161b; Instituto Cinematográfico Danés: 49; Timo Kamph: 85ad; Lehrstuhl für Geschichte de Naturwissenschaften und Technik, Museo Boerhaave, Leiden, Países Bajos: 61bi; Melvin A. Miller, Argonne National Laboratory: 142; Universidad de Frankfurt: 145; Universidad de New Hampshire, Ohio: 161a; Universidad de Stuttgart: 45, 61a; Betty Schultz: 105b; Smithsonian Libraries: 29; Ulstein Bilderdienst, Berlín: 113ai; Wolfgang Pauli-Archiv, Zollikon bei Zürich: 85b.

ISBN: 978-84-473-7629-2
Depósito legal: B-28710-2015

Impreso y encuadernado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)

Impreso en España - *Printed in Spain*

Sumario

INTRODUCCIÓN 7

CAPÍTULO 1 Albores cuánticos 15

CAPÍTULO 2 La crisis de los modelos atómicos 41

CAPÍTULO 3 La incertidumbre cuántica 67

CAPÍTULO 4 En defensa de la física teórica 109

CAPÍTULO 5 La fisión nuclear y la guerra 131

CAPÍTULO 6 Hombre público, hombre privado 155

LECTURAS RECOMENDADAS 171

ÍNDICE 173

Introducción

En 1998 se estrenó en Londres la obra de teatro *Copenhaguen*, del novelista y dramaturgo inglés Michael Frayn. Los tres personajes de la historia —Niels Bohr, su esposa Margrethe y Werner Heisenberg— se encuentran después de muertos y evocan algunos episodios comunes. Al principio de la obra, Heisenberg dice que solo es recordado por el principio de incertidumbre y por la misteriosa conversación que mantuvo con Bohr en la visita que le hizo en 1941 a Copenhague, cuando Dinamarca, como gran parte de Europa, estaba ocupada por los nazis. Y añade que todo el mundo entiende, o más bien cree entender, de qué trata el principio de incertidumbre, pero se lamenta de que nadie entienda realmente por qué fue a Copenhague. La conversación no tuvo testigos y, aunque con el paso del tiempo hayan podido variar las versiones de sus protagonistas, uno y otro discreparon siempre acerca de su contenido y de las intenciones de Heisenberg. La obra de Frayn pone en escena estas discrepancias e intenta aportar elementos de reflexión sobre el papel de los científicos en situaciones políticas y militares extremas.

El personaje de la obra hace un resumen del legado de Heisenberg en dos únicos aspectos, que conviene ahora matizar y poner en contexto. Empecemos por la parte científica. Heisenberg forma parte de esa pléyade de científicos geniales que abren nuevos e insospechados caminos para que otros hagan avanzar el conoci-

miento sobre bases sólidas. A finales del siglo XIX muchos científicos pensaban que la física estaba llegando a su final, pues, según ellos, todo estaba ya descubierto. Eso dijeron a Max Planck en 1874, cuando este se propuso estudiar física: uno de sus profesores le desaconsejó desperdiciar su enorme talento en un terreno en el que apenas quedaban dos o tres agujeros que tapar. Afortunadamente, Planck no siguió ese consejo. En 1894, el estadounidense Albert Michelson abundaba en la misma idea acerca del final de la física, y añadía que el progreso en dicha materia solo suponía hacer medidas cada vez más precisas. En retrospectiva, esta rotunda afirmación no deja de ser curiosa, pues el propio Michelson realizó entre 1891 y 1897 una serie de experimentos para detectar el movimiento de la Tierra en el éter. Hoy sabemos que el resultado negativo de estos experimentos encontró su acomodo en la teoría de la relatividad, formulada en 1905 por Einstein. Pero estas opiniones tan poco optimistas sobre el futuro de la física se debían al extraordinario nivel de desarrollo y de predicción que había alcanzado, insospechado cien años antes, como ilustran los dos ejemplos siguientes. En primer lugar, las pequeñas anomalías observadas en la órbita de Urano llevaron a predecir la existencia de un nuevo planeta, que fue encontrado en 1846 precisamente donde decían los cálculos de la mecánica celeste que debía estar; se trata de Neptuno. Por otro lado, las ecuaciones de Maxwell, publicadas en 1874, sintetizan las propiedades de los campos eléctricos y magnéticos, y a partir de ellas se predijo la existencia de ondas electromagnéticas, que fueron producidas y detectadas en 1887, y no pasó mucho tiempo antes de que aparecieran las comunicaciones por radio. Estos son solo dos casos entre los muchos éxitos de la física en el siglo XIX, que para muchos científicos no podían seguir produciéndose durante mucho más tiempo. Sin embargo, en los últimos años del siglo XIX no faltaron nuevos descubrimientos inesperados. Los rayos X fueron descubiertos en 1895 por el alemán Wilhelm Röntgen; el francés Henri Becquerel descubrió el fenómeno de la radiactividad en 1896; el inglés J.J. Thomson descubrió el electrón en 1897. Estos tres nuevos fenómenos abrieron nuevas vías en el conocimiento de la materia a escala microscópica.

En abril de 1900, el escocés William Thomson (más conocido como lord Kelvin) dio una conferencia sobre los problemas existentes en relación con el éter y el cuerpo negro, a los que se refirió, de manera metafórica, como la presencia de dos «nubes» en las teorías de la luz y del calor. Lo que no se imaginaba lord Kelvin era que esas nubes trajeran consigo el surgimiento de dos nuevas teorías físicas que establecerían los límites de validez de la física conocida hasta ese momento. Desde las primeras décadas del siglo XX se ha hablado de física moderna para referirse a esas dos nuevas teorías, la relatividad y la mecánica cuántica. La física desarrollada anteriormente se conoce como física clásica, pero eso no significa que sea antigua u obsoleta: es la física que se necesita para entender la mayoría de los fenómenos de la vida cotidiana, para explicar los movimientos planetarios o para construir un puente, por ejemplo. De forma muy esquemática se puede decir que la descripción que proporciona la física clásica es suficiente siempre que las velocidades típicas involucradas sean mucho más pequeñas que la de la luz; de lo contrario, es necesario utilizar la teoría de la relatividad. La física clásica también es suficiente siempre que las escalas típicas de los sistemas considerados sean mucho mayores que las escalas atómicas; si no es así, es necesario recurrir a la mecánica cuántica. Además de fijar límites a la física clásica, la relatividad y la mecánica cuántica trajeron consigo una profunda revisión de conceptos anclados en nuestra intuición. Las ideas «clásicas» de espacio y de tiempo, de partículas y de ondas, del principio de causalidad, etc., tuvieron que ser modificadas, abandonando ideas desarrolladas hasta entonces por eminentes filósofos y científicos.

La elaboración de la teoría de la relatividad, especial y general, fue obra prácticamente de una sola persona: Albert Einstein, quien lo hizo en dos cortos períodos de tiempo. En cambio, la mecánica cuántica tuvo, en comparación, un proceso mucho más largo, que requirió el concurso de bastantes científicos, uno de los cuales fue Heisenberg. En 1925, cuando aún no había cumplido los veinticuatro años, el científico alemán fue el primero en establecer las bases formales de la mecánica cuántica, por lo que le fue concedido el premio Nobel de Física en 1932. Según la men-

ción del premio, la mecánica cuántica es «un método general para resolver los múltiples problemas que han surgido como resultado de las incesantes investigaciones experimentales sobre la teoría de la radiación [...], ha creado nuevos conceptos y ha llevado a la física a nuevas líneas de pensamiento [...] de importancia fundamental para nuestro conocimiento de los fenómenos físicos».

También se menciona que Heisenberg predijo que la molécula de hidrógeno aparece de dos formas distintas, cosa que fue confirmada poco después por los experimentos. Pero el premio no se refiere a su resultado más popular, el principio de incertidumbre, pues es una mera consecuencia de lo anterior. Tampoco hace mención —porque no se podía imaginar en aquellos años— de la ingente cantidad de aplicaciones derivadas de la mecánica cuántica. Ordenadores, teléfonos móviles, lectores de DVD..., todos ellos dispositivos electrónicos sin los que no se puede concebir el siglo XXI, producto de tecnologías basadas en semiconductores o en láseres, que a su vez se han desarrollado gracias al conocimiento proporcionado por la mecánica cuántica. Como dato para tener una idea de su importancia en nuestra vida diaria, se estima que un 30% del producto interior bruto de Estados Unidos está relacionado con aplicaciones de la mecánica cuántica.

Puede llamar la atención el hecho de que la mayoría de los científicos que sentaron las bases de la física atómica y de la mecánica cuántica fueran alemanes. No resulta extraño si se tiene en cuenta que, a principios del siglo XX, Alemania era líder mundial en el campo de las ciencias, sobre todo en la química y en sus aplicaciones industriales. Lo más sorprendente es que se realizaran estos avances durante unos años muy difíciles para el país desde cualquier punto de vista. Después de la Primera Guerra Mundial, gran parte de la comunidad científica alemana estaba en activo, pero la situación económica del país hacía muy difícil conseguir fondos para la investigación. A pesar de todo, se desarrolló la mecánica cuántica y se aplicó a otros campos de la física.

La República de Weimar, surgida en Alemania después de la Primera Guerra Mundial, no tuvo continuidad con la llegada del nazismo en 1933. Con esto llegamos al otro aspecto mencionado por el personaje de Frayn: la visita a Copenhague en pleno apogeo

del dominio nazi en Europa, cuyos motivos se siguen discutiendo entre los especialistas. ¿Pretendía Heisenberg obtener información a través de Bohr del programa nuclear de los aliados? ¿O quería informarles a través de Bohr del programa alemán? ¿Pensaba suscitar un debate entre científicos sobre el uso de armas nucleares que pudiera acabar en un boicot internacional a este tipo de armamento? En realidad, la visita a Copenhague es un elemento más de una controversia más amplia, en relación con el papel que desempeñó Heisenberg en la Alemania nazi, en su programa nuclear, en el desarrollo de la bomba atómica. Entre los científicos e historiadores que se han interesado en esclarecer este asunto se expande todo un espectro de opiniones, desde quienes sostienen que fue un simpatizante de los nazis, hasta los que lo convierten en un activo resistente antinazi. Todo sería muy fácil de explicar si en la década de 1930 Heisenberg hubiera emigrado o si se hubiera afiliado al partido nazi, pero la realidad es más complicada y no es posible dar una respuesta en términos rotundos. A pesar de las ofertas que recibió de varias universidades estadounidenses, Heisenberg se quedó en Alemania y ejerció funciones importantes, sin por ello pertenecer a ninguna organización próxima al régimen. Tomó iniciativas para contrarrestar decisiones del nazismo, y fue atacado por sectores del partido debido a su actitud apolítica y en defensa de la física teórica. Aquí las preguntas suscitadas son otras: ¿Quiso construir una bomba atómica para Hitler? ¿O hizo lo posible para boicotear su construcción? ¿Sabía realmente cómo construirla? Los historiadores mantienen el debate e intentan situar cada elemento, cada detalle, en su contexto general y sacar conclusiones.

En el presente libro se combinan aspectos biográficos, históricos y divulgativos para abordar el legado de Heisenberg. Se verá que su biografía está indisolublemente ligada a la física y a la política científica. Fuera de la ciencia y de los temas relacionados con ella, su vida se dedicaba a la música, al contacto con la naturaleza y, llegado el momento, a su esposa e hijos. En lo que concierne a la física, el objetivo es describir y situar en su contexto histórico las contribuciones de Heisenberg a la mecánica cuántica y a otros campos de la física. En este itinerario encontraremos muchas bi-

furcaciones, pero, por razones obvias, no las seguiremos todas, a pesar de su interés. En lo referente al programa nuclear nazi, es poco probable que se puedan dar respuestas claras a cada una de las preguntas que se plantean acerca de la posición tomada por Heisenberg. En todo caso, no es este el lugar adecuado para responderlas, aunque se dan elementos para que el lector se haga una idea propia, sobre todo para que la descripción de la actividad de Heisenberg en la época nazi lo lleve a reflexionar sobre las relaciones entre la ciencia y la guerra, o sobre la responsabilidad social de los científicos. Para completar la información sobre los temas aquí tratados, en la bibliografía se facilitan algunas referencias seleccionadas.

1901 Werner Karl Heisenberg nace en Würzburg (Alemania) el 5 de diciembre.

1920 Ingresa en la Universidad de Múnich y en el seminario del físico Arnold Sommerfeld.

1923 Obtiene el grado de doctor en la Universidad de Múnich. Se convierte en ayudante de Max Born en Gotinga.

1925 Junto con Born y Jordan, redacta el «Dreimännerarbeit» («Trabajo de los tres hombres»), que recoge los postulados básicos de la nueva teoría cuántica: existencia de estados estacionarios de energía en los átomos y saltos cuánticos entre estados con emisión o absorción de luz.

1927 Publica el principio de incertidumbre, que consagra la relación entre el observador y lo observado en el ámbito cuántico.

1928 Es nombrado catedrático de Física Teórica en la Universidad de Leipzig.

1932 Expone el modelo cuántico del núcleo, en el que propone que neutrón y protón son dos estados cuánticos de una misma partícula.

1933 Recibe el premio Nobel de Física de 1932 por establecer las bases formales de la mecánica cuántica.

1937 El 29 de abril se casa en Berlín con Elisabeth Schumacher.

1939 A finales de septiembre es movilizado por el ejército para trabajar en el proyecto nuclear alemán.

1942 Es nombrado director del Instituto de Física Kaiser Wilhelm en Berlín.

1943 Recibe el cargo de catedrático de Física Teórica en la Universidad de Berlín. Formula la teoría de la matriz S para describir las colisiones entre partículas elementales.

1945 Es detenido por los aliados el 3 de mayo y trasladado en julio a Farm Hall (Inglaterra).

1946 Desarrolla las tareas de director del Instituto Max Planck de Física y Astrofísica de Gotinga.

1951 Es nombrado presidente de la Comisión para la Física Atómica y de la delegación alemana para la constitución del CERN.

1953 Es elegido presidente de la Fundación Von Humboldt, dedicada a becar a científicos extranjeros para impulsar la investigación con otros países.

1976 El 1 de febrero, muere de cáncer en su casa de Múnich.

CAPÍTULO 1

Albores cuánticos

En los últimos años del siglo XIX y primeros del XX descubrimientos tales como el electrón, los rayos X, la radiactividad o el efecto fotoeléctrico proporcionaron una visión inédita de la realidad a escala atómica. Pero ese conocimiento trajo consigo nuevos interrogantes. La materia se comportaba de forma tan extraña que para dar cuenta de ello hubo de acudir a ideas rompedoras: la luz está formada por «paquetes» de energía, hay partículas que se comportan como ondas... eran los albores de la revolución cuántica.

La etapa de la infancia y adolescencia de Heisenberg coincide con el período inicial de la teoría cuántica. Poco después de su ingreso en la Universidad de Múnich empezó su contribución al desarrollo de la reciente física atómica. La Primera Guerra Mundial y la posguerra ayudaron a conformar el entramado social en el que se movían los científicos que crearon y desarrollaron la nueva teoría.

La familia Heisenberg dispone de un árbol genealógico muy completo, que cubre unas seis generaciones. Lo empezó Werner Heisenberg en la década de 1930, cuando tuvo que acreditar su pureza aria ante las autoridades nazis. En la familia paterna abundaban los artesanos, como toneleros o cerrajeros, mientras que la materna estaba formada por campesinos y granjeros. En el último tercio del siglo XIX, el desarrollo económico e industrial del Imperio alemán abrió una puerta a la promoción social de las clases medias, cuyos miembros podían acceder a la educación superior y convertirse en médicos, abogados, jueces o funcionarios del Imperio. El abuelo materno, Nikolaus Wecklein, estudió lenguas clásicas, y fue director del Max Gymnasium, un selecto centro de educación secundaria de Múnich. Por su parte, el padre, August Heisenberg, fue profesor de griego y latín. En aquella época, la elección de las lenguas clásicas como vía de promoción social era más eficaz que en la actualidad.

Al finalizar la enseñanza primaria se orientaba a los niños a una formación técnica o bien a una formación preparatoria a la universidad. Esta última, dirigida sobre todo a las clases alta y media, tenía lugar en el Gymnasium. Con este nombre se referían los antiguos griegos a la institución pública donde adolescentes y jóvenes practicaban ejercicios físicos diversos, a la vez que se instruían en filosofía, literatura, oratoria, arte o música. Desde el siglo XVI se usó el mismo nombre en distintos países europeos para designar un lugar de enseñanza pública y, con el tiempo, se reservó a un centro de enseñanza secundaria.

«Con su trabajo independiente en el campo de la física matemática ha llegado mucho más allá de lo que se exige en el Gymnasium.»

— ANOTACIÓN DE UN PROFESOR EN LOS EXÁMENES FINALES DE HEISENBERG, 1920.

August Heisenberg obtuvo su doctorado y empezó a dar clases en el Max Gymnasium. Al mismo tiempo, siguió con sus trabajos e investigaciones sobre el griego clásico para preparar su «habilitación», una especie de segundo doctorado imprescindible para poder dar clases en la universidad. En 1899 se casó con Annie Wecklein, una de las dos hijas de su director. Tras el nacimiento del primer hijo, Erwin, el matrimonio se trasladó a Würzburg, ciudad situada a unos 200 km al norte de Múnich, puesto que August había sido nombrado profesor de su Gymnasium. En Würzburg nació Werner Karl, el 5 de diciembre de 1901, año y medio después de su único hermano y uno más tarde del año que se considera que nació la teoría cuántica.

La muerte repentina del catedrático de griego de la Universidad de Múnich supuso un cambio en la vida de los Heisenberg. Normalmente, al producirse una vacante o crearse una nueva plaza, la universidad consultaba a diversos expertos, dentro y fuera del país, con el fin de proponer al ministerio una terna ordenada de candidatos. Pero en este caso se propuso un único nombre, debido a las muy buenas referencias que acompañaban al candidato y a la urgencia para cubrir la plaza. De esta manera,

a principios de 1910, August Heisenberg empezó sus funciones como titular de la única cátedra de filología bizantina existente en Alemania.

En una entrevista realizada en los años 1960, Werner Heisenberg evocaba dos aspectos importantes de la influencia paterna en su vida. Decía que como su padre era un buen maestro, utilizaba juegos para educar a sus dos hijos, tratando de fomentar la competencia entre ellos. Entre esos juegos incluyó los problemas de matemáticas que tenía que resolver el hermano mayor. Ese hecho fue para Werner un modo de estimulación precoz, pues descubrió que podía resolver rápidamente esos problemas, y a partir de ese momento desarrolló un interés especial por las matemáticas. Por otro lado, el padre también estimuló la afición de sus hijos por la música. Heisenberg empezó a estudiar violonchelo, pero pronto se pasó al piano. A menudo acompañaba a su padre, que cantaba lieder y arias para tenor. Heisenberg siguió cursos de piano y tocó dicho instrumento durante toda su vida, alcanzando un nivel muy alto para un aficionado. La música, en particular la de cámara, ocupó siempre un lugar destacado en su vida intelectual y emocional.

LA ENSEÑANZA SECUNDARIA

En Alemania, desde la reforma educativa de Humboldt en el siglo XIX, el objetivo principal de un Gymnasium era proporcionar una formación humanística, basada en el conocimiento de los clásicos griegos y latinos, como mejor modo de impartir una educación moral e intelectual a quienes más tarde formarían la élite de la sociedad. El Gymnasium era la vía obligatoria para acceder a la universidad, y prácticamente la única forma de promoción social para la clase media.

Aunque a principios del siglo XX las necesidades de la sociedad abrieron otros centros de formación, el Gymnasium siguió conservando su carácter elitista. Los profesores de latín y griego gozaban de un gran prestigio e importancia en la sociedad. Ade-

más, se les exigía el grado de doctor para poder titularse en uno de estos centros, algo que no se requería a los profesores de otras materias.

En septiembre de 1911, Heisenberg empezó la enseñanza secundaria en el Max Gymnasium, dirigido por su abuelo hasta el retiro de este en 1913. Los alumnos estudiaban durante nueve cursos, normalmente desde los once hasta los diecinueve años. Del total de horas de clase se dedicaba casi el 40% a las lenguas y literatura clásicas, y un 24% al alemán y a las matemáticas. Las restantes horas de clase cubrían, con irregular distribución, materias como historia, religión, francés o dibujo. Las clases de física se reducían a dos horas semanales durante los tres últimos cursos.

«Estaba muy interesado en el teorema de Fermat y, naturalmente, durante algún tiempo intenté demostrarlo, como todo el mundo.»

— Heisenberg, en referencia a su adolescencia. Conversaciones con el historiador de la ciencia **T.S. Kuhn, 1962.**

Los informes escolares de los profesores de Heisenberg destacaban sus excelentes cualidades y amplios conocimientos. No en vano fue uno de los mejores alumnos de su clase y siempre obtuvo las máximas calificaciones en matemáticas. Tal vez gracias a los juegos competitivos que su padre establecía entre los dos hermanos, al llegar al Gymnasium tenía conocimientos más avanzados de lo que se requería en su nivel. Además, tuvo un profesor de matemáticas que le estimulaba proponiéndole problemas especiales, al margen de los que trataban en las clases. Su padre, consciente del interés de su hijo por las matemáticas, le consiguió algunos libros... pero escritos en latín, para matar dos pájaros de un tiro. De hecho, debía de tener una idea elevada sobre las posibilidades de su hijo, y al mismo tiempo escasos conocimientos de matemáticas porque, entre otros libros, le facilitó una copia de la tesis doctoral sobre teoría de números, del

famoso matemático Kronecker, publicada en 1845. Aunque no entendió muchas cosas, Heisenberg descubrió así las propiedades de números enteros como números primos, criterios de divisibilidad, el teorema de Fermat, etc. Sin saberlo, el padre había acertado, pues, en 1916, los temas de máximo interés para Heisenberg eran la música y la teoría de números.

LA MAGIA DE LOS NÚMEROS ENTEROS

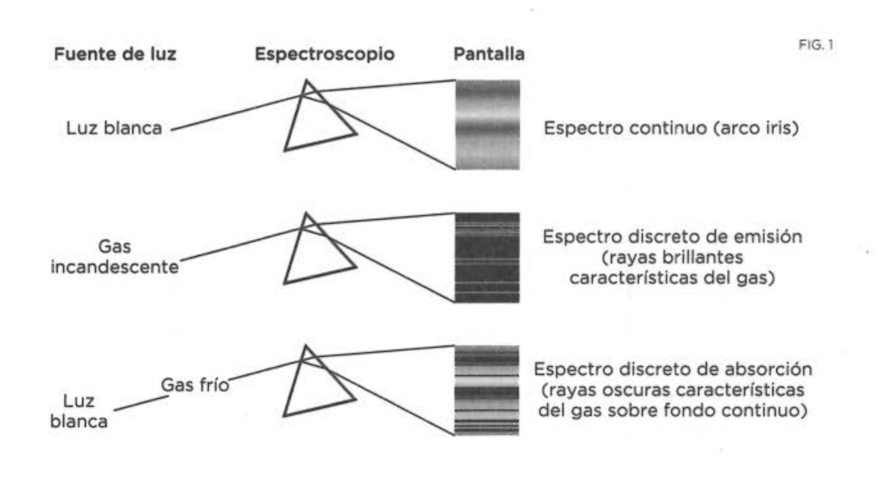
Un antecedente de la física cuántica tiene que ver precisamente con números enteros, en relación con los espectros atómicos. Pero antes conviene que hablemos de los conceptos de continuo y discreto, a los que haremos referencia en breve. Pensemos en todos los números decimales que empiezan por cero, como 0,73649100093. Existe un número infinito de ellos, pues siempre podemos añadir cifras y cifras sin límite detrás de la coma decimal. Estos números forman un conjunto continuo, porque dados dos cualesquiera de ellos siempre se puede encontrar otro que esté comprendido entre ambos. Sin embargo, de este conjunto infinito de números se pueden extraer series particulares, como por ejemplo 1/2, 1/3, 1/4, 1/5..., o $1/2^2$, $1/3^2$, $1/4^2$, $1/5^2$... Estas series contienen también un número infinito de términos, pero no forman un conjunto continuo, porque no siempre se cumple la propiedad anterior: por ejemplo, entre 1/3 y 1/4 no hay ningún otro número de la serie. Se dice que estos números forman un conjunto discreto, y ese carácter discreto se refleja en la presencia de números enteros. Aclarado esto, volvamos ahora a los espectros atómicos.

Cuando la luz del Sol atraviesa un prisma se forma un arco iris, un degradado continuo de colores. Cada color de este espectro continuo se caracteriza por una frecuencia o, equivalentemente, por una longitud de onda. Ambas magnitudes están relacionadas: el producto de la frecuencia por la longitud de onda es igual a la velocidad de propagación de la onda. Consideremos ahora un gas calentado hasta alcanzar la incandescencia,

como sucede en un tubo fluorescente o en las lámparas que iluminan las carreteras. Si esa luz emitida por el gas se hace pasar por un prisma no se observa un degradado de colores, sino solamente unas líneas brillantes en ciertos valores de la frecuencia; por eso se habla en este caso de espectro discreto. Además, si se analiza mediante un prisma la luz blanca que ha pasado antes a través de un gas, se observa que sobre el espectro continuo aparecen superpuestas unas rayas oscuras, precisamente a las

LOS ESPECTROS

Los gases incandescentes emiten radiación, que puede analizarse mediante un espectrómetro. El elemento esencial de este aparato es un prisma, y los demás componentes, como escalas, lentes y otros dispositivos ópticos, sirven para poder medir con precisión las longitudes de onda o frecuencias luminosas, tanto en el espectro visible como en el ultravioleta o el infrarrojo. Según se refleja en la figura 1, cuando se hace pasar luz blanca por el prisma se observa un espectro continuo, un degradado de colores. En cambio, cuando se hace pasar la luz emitida por un gas incandescente solo se ven unas líneas brillantes en ciertos valores de la frecuencia, y por eso se habla en ese caso de *espectro discreto*. Además, si se analiza mediante un prisma la luz blanca que ha pasado antes a través de un gas, se observa que en el espectro con-

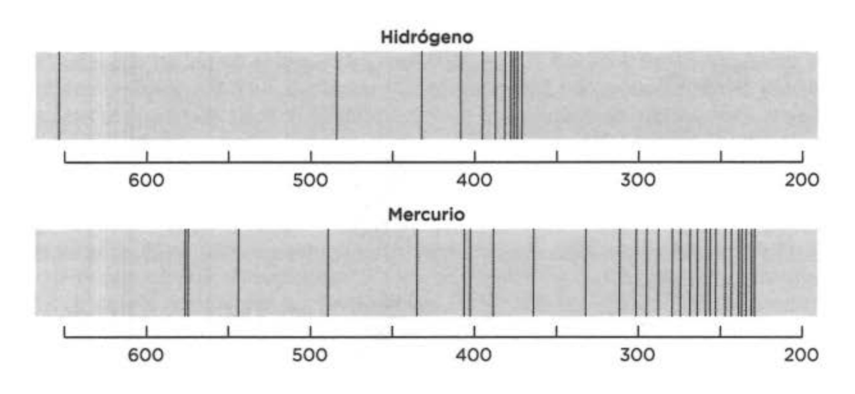


frecuencias de las rayas brillantes emitidas por ese mismo gas incandescente.

En 1860, los alemanes Kirchhoff y Bunsen mostraron que los espectros discretos permiten identificar los elementos, al igual que hoy en día los productos envasados se identifican mediante un código de barras. Para ello, convenía hacer un catálogo detallado de las frecuencias correspondientes a cada elemento, es decir, una lista con los valores medidos. Además, para entender el

tinuo aparecen unas rayas oscuras, precisamente a las frecuencias que corresponden a las rayas brillantes emitidas por ese mismo gas incandescente.
En la figura 2 se muestra una porción del espectro del hidrógeno y del mercurio, con longitudes de ondas comprendidas entre 660 y 190 nm (nanómetros, es decir, una mil millonésima de metro). El espectro visible corresponde a 700-400 nm. La frecuencia de cada línea se obtiene dividiendo la velocidad de la luz (300000 km/s) por la correspondiente longitud de onda. Esta frecuencia es proporcional a la diferencia de dos energías. Lo que se pretendía conseguir en los inicios de la física atómica era deducir los valores de estas energías, que dependen de ciertos números cuánticos, a partir de sus diferencias. Pronto se descubrió que no aparecían todas las posibles diferencias, lo que se reflejó en unas reglas de selección, que había que escribir en función de números cuánticos.


FIG. 2



origen de las rayas espectrales había que encontrar relaciones entre las frecuencias observadas, no solamente del espectro visible —el que podemos ver con nuestros ojos—, sino también de los espectros infrarrojo y ultravioleta, que se observan mediante detectores adecuados. La cosa no era sencilla, pues el número de rayas de ese código puede ser enorme, por ejemplo, varios miles en el caso del hierro.

El espectro atómico más sencillo es el del átomo de hidrógeno. En la zona visible del espectro aparecen solo cuatro rayas, cuyas longitudes de onda fueron medidas con gran precisión en 1884 por el sueco Anders Ångström. Al año siguiente intervino en este punto el suizo Johann Balmer, un profesor de matemáticas que daba clases en escuelas técnicas y colegios femeninos de Basilea, su ciudad natal. Más de veinte años después de doctorarse, Balmer obtuvo la habilitación y pudo dar algunas clases en la universidad. El científico suizo decía a sus amigos y colegas que si le daban una serie de números, podía encontrar una fórmula matemática que los relacionara. Un colega suyo le retó a que lo hiciera con las recientes medidas del espectro de hidrógeno, y Balmer lo consiguió. Fue un hallazgo muy afortunado, que adquirió un interés mayor cuando otros científicos lo generalizaron y pudieron caracterizar el espectro completo del hidrógeno, empezando así a poner orden en los «códigos de barras» espectrales. Las frecuencias de las líneas espectrales son proporcionales a las inversas de dos números enteros al cuadrado. La expresión matemática, conocida como relación de Rydberg-Ritz, es

$$f = R\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right),$$

donde m y n son dos números enteros ($m<n$), y R es la constante de Rydberg.

Sin embargo, no había justificación alguna para la fórmula de Balmer, que era pura numerología. Dicho esto, vamos a comprobar ahora que en el nacimiento de la teoría cuántica también aparecieron números enteros.

LA NUMEROLOGÍA DE BALMER



¿Cómo pudo razonar Balmer para llegar a su fórmula mágica? El punto de partida son los valores, en nm (nanómetros), de las cuatro longitudes de onda:

656,21: 486,07: 434,01: 410,12.

Para empezar, los dividiremos por el más pequeño. Sin necesidad de escribir todos los decimales de las divisiones, los nuevos números son:

1,6 : 1,185 : 1,058 : 1.

Los dos puntos indican que se representan cocientes de números. Ahora hay que encontrar la manera de escribirlos como números racionales, es decir, cocientes de dos números enteros. Después de unos tanteos, podemos ver que si multiplicamos los cuatro números por 9/8 obtenemos:

9/5 : 4/3 : 25/21 : 9/8.

Sería conveniente que los denominadores aparecieran en orden creciente, y podemos conseguirlo si multiplicamos el segundo y cuarto números por 4/4, que, evidentemente, es 1. La nueva serie de números es:

9/5; 16/12; 25/21; 36/32.

Sin duda, este es el resultado al que llegó Balmer. ¿Se aprecia alguna regularidad en estos números? A Balmer no se le escapó que los numeradores son cuadrados de números enteros sucesivos (3, 4, 5, 6) y los denominadores se obtienen restando a los numeradores el número 4, convenientemente escrito como el cuadrado de 2. Y llegamos al final: si a cada línea espectral se le asocia un número entero n, las longitudes de onda son proporcionales al cociente $n^2/(n^2-2^2)$, donde n toma los valores 3, 4, etc. El lector puede verificar que la constante de proporcionalidad vale 364,56 nm. Como es natural, esta expresión no contiene ninguna información física, es simplemente un juego con números. Pero como el propio Balmer conjeturó, se pudo extender a otras líneas espectrales al reemplazar 2^2 por los cuadrados de los siguientes enteros. Si se quiere considerar las frecuencias, dado que son inversamente proporcionales a las longitudes de onda, se obtiene que, salvo por una constante global, vienen dadas por la serie $1/2^2-1/n^2$.

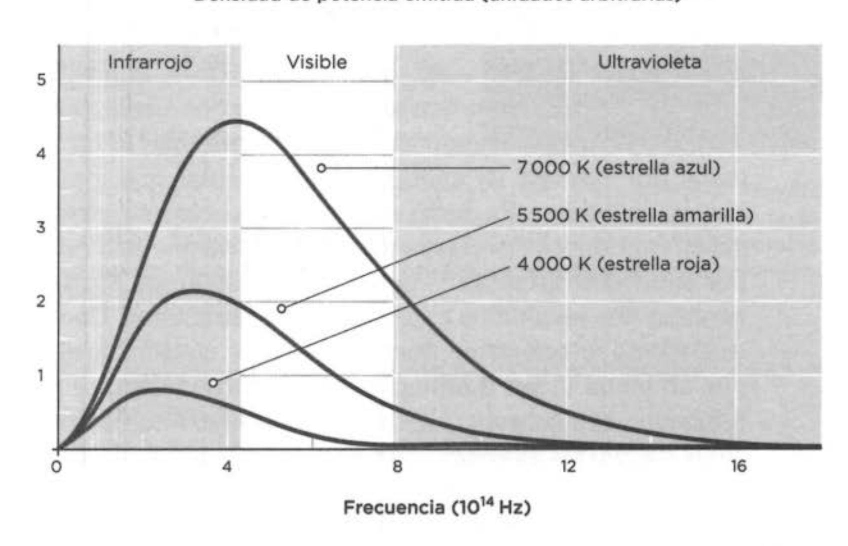
LAS DISCONTINUIDADES CUÁNTICAS

El nacimiento de la teoría cuántica tuvo que ver con un problema más bien técnico. En la segunda mitad del siglo XIX, científicos e ingenieros se interesaban en el estudio del *cuerpo negro*, un objeto ideal llamado así porque es capaz de absorber toda la radiación que le llega. Llevado a la práctica, un cuerpo negro es una cavidad, mantenida a temperatura constante, cuya radiación interior se observa a través de un pequeño orificio. El interés de este objeto ideal se puso de manifiesto cuando Kirchhoff demostró que la intensidad de la radiación (de manera más precisa, la energía de la radiación por unidad de volumen y por unidad de frecuencia en el interior de la cavidad) es independiente de la naturaleza de las paredes, y solo depende de la frecuencia de la radiación y de la temperatura de la cavidad. Así, el estudio del cuerpo negro adquirió una gran importancia práctica para la obtención de patrones de fuentes luminosas.

En su momento, la intensidad de la radiación se midió sin demasiados problemas. Al representarla en función de la frecuencia se obtiene una curva que tiene su inicio en cero, pasa por un máximo y vuelve a cero cuando la frecuencia aumenta. La curva parece una campana no simétrica, cuyas altura y anchura dependen de la temperatura. Pero esta bonita curva no se podía deducir ni justificar a partir de las teorías conocidas. A finales de 1900, el alemán Max Planck consiguió de manera empírica una fórmula matemática que reproducía los datos observados para cualquier frecuencia y cualquier temperatura. Cuando quiso justificarla a partir de consideraciones teóricas generales tuvo que hacer una hipótesis muy especial (un «acto de desesperación», en sus propias palabras), y tuvo que suponer que la radiación de frecuencia f no puede intercambiar con la materia cualquier valor de la energía, sino que solo puede hacerlo en múltiplos enteros de una cantidad mínima proporcional a la frecuencia de la radiación. Los intercambios de energía son cantidades discretas nhf donde la constante de proporcionalidad h se denominó *cuanto de acción* —así se llama en física al producto de una energía por un tiempo—, pero pronto recibió su nombre actual de *constante*

EL CUERPO NEGRO

La curva de emisión de un cuerpo negro se parece a una campana asimétrica, cuya forma exacta depende de la temperatura. Cabe precisar que no siempre las palabras utilizadas en física se corresponden con su uso cotidiano: las estrellas se comportan como un cuerpo negro, y la medida de su curva de emisión permite conocer la temperatura de su superficie. Así se sabe que el Sol tiene una temperatura en su superficie de unos 6 000 °C, en números redondos. Del estudio de la radiación de fondo existente en el universo se deduce que este está a una temperatura de unos 3 K.



de Planck. En unidades del sistema internacional, o unidades a escala humana (kilogramos, metros, segundos...), el valor de esta constante o cuanto de acción es pequeñísimo: $h \approx 6{,}6 \cdot 10^{-34}$. Al ser su valor tan pequeño, está claro que la hipótesis de Planck no tiene efectos prácticos en la vida cotidiana, pero esto es algo que se matizará más adelante. En ocasiones se habla de la «hipótesis revolucionaria» de Planck, pero lo cierto es que en su día

nadie advirtió tal revolución. Los científicos interesados en el cuerpo negro solo consideraban su fórmula maravillosa, cuya validez se confirmaba cada vez con mayor precisión, y no daban ninguna importancia al razonamiento que había seguido Planck para deducirla.

LA DUALIDAD ONDA-CORPÚSCULO

En este marco, Einstein fue una excepción y no solo tomó en serio la hipótesis de Planck sino que la llevó más lejos, atribuyéndole conscientemente un carácter revolucionario. En uno de sus famosos artículos de 1905 —su *annus mirabilis*—, el que lleva por título «Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la producción y transformación de la luz», sugirió que la luz está formada por *cuantos de energía*, por partículas que, desde 1924, llamamos fotones. Es decir, si la radiación solo intercambia energía en cantidades discretas, es porque ella misma está constituida por entidades discretas. Con esta nueva hipótesis, Einstein pudo explicar dos resultados experimentales intrigantes. Uno de ellos es el efecto fotoeléctrico, que consiste en la emisión de electrones por un metal al ser iluminado con luz ultravioleta; se trata del fenómeno que subyace a las actuales células fotoeléctricas. Einstein explicó las medidas obtenidas en 1902 por Philipp Lenard, y predijo resultados que fueron confirmados en 1916 por Robert Millikan. El otro resultado intrigante se refiere al calor específico de los sólidos, una medida de cómo varía la temperatura de los sólidos al ser calentados. Desde principios del siglo XIX se sabe que el calor específico de los sólidos es constante a temperaturas suficientemente altas, algo que se explica con facilidad en el marco de la física clásica. Sin embargo, a temperaturas bajas aparecían cada vez más excepciones a la explicación clásica. En un estudio que fue posteriormente refinado por el holandés Debye, Einstein demostró que los cuantos de energía reproducían las observaciones a cualquier temperatura. De esta manera, una hipótesis hecha por Planck especialmente para resolver un problema

MAX PLANCK

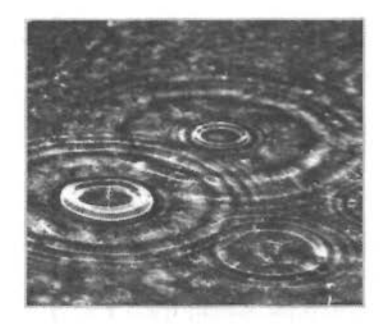


Max Karl Ernest Ludwig Planck (1858-1947) fue uno de los eminentes alumnos del Max Gymnasium de Múnich, el mismo centro en el que estuvo Werner Heisenberg años más tarde. Estudió en Berlín, con Hermann von Helmholtz y Gustav Kirchhoff, entre otros, y en 1879 se doctoró en Múnich con una tesis sobre la segunda ley de la termodinámica. Catedrático de física teórica de la Universidad de Berlín desde 1887, Planck es conocido sobre todo por su estudio, en 1900, del cuerpo negro, que representa el nacimiento de la moderna mecánica cuántica y por el que recibió el premio Nobel de Física de 1918. Este ilustre científico alemán gozó de un inmenso prestigio entre el resto de los científicos de su país, tanto por sus cualidades científicas como morales. La más prestigiosa institución alemana actual de investigación lleva su nombre: la Sociedad Max Planck, que engloba institutos en los que se desarrolla investigación de excelencia en ciencias naturales, sociales y humanas.

—la emisión de radiación por el cuerpo negro— fue extendida por Einstein a otros problemas muy distintos, y logró reproducir las observaciones experimentales de modo muy satisfactorio.

Pero esta hipótesis de los fotones planteaba otro problema. A lo largo del siglo XIX se habían ido acumulando evidencias de que la luz es una onda electromagnética. Por tanto, si la luz está formada por partículas, ¿qué ocurre con la teoría ondulatoria? Einstein era consciente de la dificultad, y por eso el título de su artículo se refería a «un punto de vista heurístico», que es una manera erudita de decir que no se demuestra rigurosamente, sino mediante una comparación con las observaciones. La hipótesis de los fotones fue confirmada en 1922 por el estadounidense Compton. En su experimento envió un haz de rayos X sobre electrones, y

PARTÍCULAS Y ONDAS EN LA FÍSICA CLÁSICA



La dualidad onda-partícula es una cuestión clave en la física cuántica. Por ello conviene recordar algunas propiedades de estos objetos según la física clásica. Imaginemos que lanzamos un guijarro sobre la superficie de un estanque. El guijarro está en nuestra mano, en el aire, en la superficie del agua, etc., pero solo ocupa una porción definida en el espacio, la de su propio volumen. Al ser lanzado, el guijarro sigue una trayectoria concreta y no se encuentra a la vez en dos o más sitios. En este movimiento se propaga una masa, la del guijarro. Cuando impacta en la superficie del agua, se origina una perturbación que se propaga por todo el estanque. Se forman círculos concéntricos, centrados en el punto de impacto, en los que el agua oscila verticalmente. Esta perturbación es un ejemplo de onda.

Desplazamientos sin masa

Da la impresión de que el agua se desplaza, pero si colocamos un corcho veremos que este solo sigue las oscilaciones verticales del agua. No se desplaza una masa, sino la perturbación; son las oscilaciones entre puntos próximos las que nos producen la sensación de movimiento. Al cabo de cierto tiempo la serie de círculos concéntricos cubre todo el estanque: la onda está definida en todo el espacio. Si dejamos caer dos guijarros en la superficie del agua, veremos formarse las ondas producidas por cada uno de ellos y, pasado un tiempo, el estanque estará afectado por una perturbación que resulta de la superposición de los dos movimientos ondulatorios iniciales. Pero el resultado es algo más que dos series superpuestas de círculos concéntricos. Hay puntos donde las alturas de cada uno de los movimientos están por encima o por debajo del nivel del agua, y se amplifica el resultado. Hay otros en los que, por separado, una altura está por encima y la otra por debajo, y se restan los efectos. A este fenómeno se le llama interferencia, y es una signatura característica de las ondas.

demostró que las observaciones se explicaban perfectamente admitiendo que los rayos X estaban constituidos por partículas. Entonces, ¿la luz es una onda o es un conjunto de partículas? En opinión de Einstein, ambas teorías de la luz debían mantenerse, a pesar de que no haya entre ellas ninguna conexión lógica. Él pen-

saba que se acabaría llegando a una especie de fusión de las teorías ondulatoria y corpuscular. De hecho, algo de eso pasó, pero no en la forma que hubiera preferido Einstein.

«Los fotones, los electrones, etc., están todos locos, pero afortunadamente para los físicos todos comparten la misma locura: la dualidad onda-partícula.»

— Richard Feynman.

En 1923, el francés Louis de Broglie llevó la idea de Einstein a otro terreno. Pensó que si la luz se describe como una onda formada por partículas, se podría decir algo semejante, pero al revés, del electrón: será una partícula asociada a una onda. De Broglie mostró que el producto del momento p del electrón —el resultado de multiplicar la masa del electrón por su velocidad— por la longitud de onda λ (se pronuncia «lambda») asociada es igual a la constante de Planck, y se escribe así: $p \cdot \lambda = h$. Esta relación fue verificada en 1927 por dos grupos independientes, en Estados Unidos y en el Reino Unido. Con diferentes diseños, estos grupos observaron que los electrones producen interferencias, que es la signatura por excelencia de un fenómeno ondulatorio, y confirmaron cuantitativamente la relación deducida por De Broglie.

Por tanto, el comportamiento extraño de la luz, que se puede manifestar como onda o como partícula, también lo exhiben los electrones y, en general, todo tipo de partículas subatómicas. Más adelante volveremos a ella; ahora vamos a ver la última pieza del rompecabezas inicial de la teoría cuántica, que tiene que ver con la física atómica.

LOS ÁTOMOS

Los antiguos griegos elaboraron en el siglo v a.C. diferentes doctrinas sobre la constitución de la materia. El atomismo era una de ellas. La materia está constituida por corpúsculos dotados de cualidades ideales: invisibles, indivisibles —eso es lo que significa

átomo—, llenos, eternos y de formas diversas. Pero la doctrina que subsistió en el mundo occidental durante más de veinte siglos afirmaba que las sustancias son una sutil mezcla de cuatro elementos: aire, fuego, tierra y agua.

En el siglo XIX, los experimentos químicos descartaron esta doctrina y sugirieron una nueva idea de átomo. Por un lado, el francés Lavoisier llamó «elementos» a aquellas sustancias que no podían descomponerse en otras más simples, lo que excluía el agua, el aire, la tierra y el fuego. Por otro, el inglés Dalton mostró que las regularidades observadas en las reacciones químicas se explicaban con facilidad aceptando la existencia de cantidades discretas extremadamente pequeñas, a las que llamó *átomos*. Sin embargo, aunque las evidencias experimentales eran cada vez más numerosas en favor de estos nuevos átomos, su realidad no se aceptó de forma unánime. Filósofos como Renan, Comte y Hegel, o científicos como Berthelot, Mach y Ostwald, eran contrarios a aceptar la existencia de algo que, en principio, era inobservable. Pero dejemos aquí la apasionante historia de la idea moderna de átomo para situarnos en 1911, cuando se descubrió lo inapropiado de su nombre.

Los experimentos realizados en Manchester por el grupo de científicos del neozelandés Ernest Rutherford (1871-1937) pusieron de manifiesto que los átomos tienen estructura. En su centro existe un núcleo de carga positiva, que contiene prácticamente toda la masa del átomo, y a su alrededor hay electrones, con carga negativa, en número suficiente para asegurar que el átomo tenga carga eléctrica nula. La imagen que resulta es una especie de sistema planetario, donde la interacción gravitatoria es reemplazada por la interacción electromagnética. Pero este modelo planetario es inestable según las propias leyes del electromagnetismo, pues toda carga eléctrica acelerada emite radiación. Ese es precisamente el fundamento de cualquier antena: la información transmitida por una emisora de radio o de televisión se transforma en variaciones de corriente, es decir, en aceleraciones de las cargas de la antena. Estas cargas emiten ondas electromagnéticas que son captadas por otra antena y traducidas en forma de sonido e imagen en el receptor. Pues bien, un electrón que gira alrededor

del núcleo es una carga eléctrica sometida a aceleración, y por tanto emite radiación. Como nada repone la energía emitida, según esta imagen los electrones perderían su energía y colapsarían con el núcleo en un intervalo muy corto de tiempo.

Por otro lado, parece evidente que los espectros atómicos proporcionan información acerca de la estructura interna de los átomos. En 1913, Bohr propuso una salida al problema haciendo intervenir la cuantificación. En sus propias palabras: «Cualquiera que sea la modificación a las leyes del movimiento de los electrones, parece necesario introducir una cantidad ajena a la electrodinámica clásica; esta cantidad es la constante de Planck». En el capítulo siguiente veremos con más detalle los primeros modelos atómicos; ahora es el momento de volver con nuestro protagonista.

LA PRIMERA GUERRA MUNDIAL

La guerra se inició el 1 de agosto de 1914 con el enfrentamiento entre los países de la Triple Entente (Francia, Reino Unido y Rusia) y los Imperios alemán y austrohúngaro, implicando después a más países. El conflicto acabó el 18 de noviembre de 1918, y en términos de la vida escolar de Heisenberg abarcó desde el cuarto hasta el octavo curso de secundaria. El comienzo de la guerra fue acogido con entusiasmo por los países implicados, en una ola de nacionalismo y unidad que dejó de lado los conflictos sociales existentes. Ningún país se veía como agresor, sino como víctima, pero lo cierto es que todos llevaban varios años preparándose para la contienda.

La estrategia militar alemana pasó por invadir Bélgica, que era país neutral. Los terribles daños originados, materiales y humanos, así como el incendio de la biblioteca de la Universidad de Lovaina, provocaron que los miembros de la Triple Entente desataran una campaña mediática en contra de Alemania, acusada de ser un país de bárbaros, agresores y destructores de la cultura. Así las cosas, un grupo de noventa y tres profesores universitarios

alemanes reaccionó con un «Manifiesto al mundo civilizado». Dando por buena la versión del ejército alemán, denunciaban la campaña de «mentiras y calumnias con las que nuestros enemigos intentan empañar el honor de Alemania», y suscribían frases como «si no fuera por el militarismo alemán, la civilización alemana habría sido extirpada hace tiempo». Este manifiesto tuvo una réplica pacifista, escrita por Georg Nicolai, profesor de fisiología de la Universidad de Berlín. Pero solo recogió tres firmas más: la del físico Albert Einstein, la del astrónomo Wilhelm Förster y la del filósofo Otto Buek. En su «Manifiesto a los europeos» afirmaban, entre otras cosas, que la guerra «difícilmente tendrá un vencedor, probablemente solo perdedores», hacían un llamamiento a la unidad europea y, en una especie de premonición, pedían «evitar que las condiciones para la paz sean fuente de futuras guerras». Pero el Manifiesto de los 93 reflejaba sentimientos mayoritarios en la sociedad alemana y tuvo una gran influencia en el mundo académico.

El padre de Heisenberg, como muchos otros profesores, fue movilizado. El Max Gymnasium mantuvo durante la duración de la contienda un programa de adoctrinamiento patriótico que, en la línea del Manifiesto de los 93, identificaba la cultura alemana con el militarismo. En 1910, un grupo de militares de Múnich había creado una asociación, la Wehrkraftverein, dirigida a los alumnos de los últimos años de secundaria para ofrecerles una preparación militar fuera del horario escolar. Se trataba de una versión paramilitar del movimiento de exploradores (Boy Scouts), que había llegado a Alemania el año anterior. Tras el estallido de la guerra, la Wehrkraftverein tomó un protagonismo particular. Una vez rebasada la edad de quince años, la mayoría de los alumnos de secundaria recibían en ella una formación dirigida a su futuro alistamiento, posible a partir de los diecisiete años. Heisenberg se integró en la sección de su Gymnasium en 1916, y durante sus vacaciones participaba en tareas agrícolas para suplir la falta de mano de obra. Finalmente, no llegó a alistarse porque el armisticio se firmó un mes antes de que cumpliera la edad mínima. Su hermano Erwin, en cambio, pasó más de un año en el frente.

El entusiasmo popular de los primeros años se fue mitigando debido a la larga duración de la guerra, a las pérdidas humanas y a la escasez de alimentos y combustible. Las tensiones sociales, diluidas en la ola patriótica inicial, volvieron a aflorar. En enero de 1918 surgieron por todo el país huelgas y manifestaciones en demanda de alimentos y de paz que fueron reprimidas por el ejército. El 8 de noviembre de 1918 se proclamó la República Socialista de Baviera; al día siguiente, Guillermo II abdicó como rey de Prusia y emperador de Alemania, y en Berlín se proclamó la República Alemana. Cuando se firmó el armisticio, sectores conservadores y derechistas se negaban a reconocer la derrota, argumentando que Alemania no había sido invadida y que una parte importante del ejército permanecía intacta. Por lo tanto, decían, el armisticio había sido una «puñalada por la espalda» de civiles traidores, principalmente bolcheviques y judíos. Durante varios años se mantuvo una situación política caótica, con asesinatos, luchas callejeras, intentos de golpes de Estado y levantamientos revolucionarios y contrarrevolucionarios en casi todo el país. Todos estos acontecimientos modelaron las ideas sociales y políticas de Heisenberg sobre la nación y sobre los deberes de los individuos frente a la patria, y son una clave importante para entender su comportamiento en los años posteriores.

EL FINAL DE LA ADOLESCENCIA

En Múnich se proclamó formalmente la República Soviética de Baviera en abril de 1919. El Gobierno de Berlín mandó unidades del ejército, junto con grupos paramilitares, para sofocar la insurrección. Estos grupos estaban formados por veteranos de guerra y aventureros, de ideas monárquicas o derechistas, que se oponían por igual a la república y a la revolución. Las autoridades universitarias instaron a los estudiantes a que se alistaran en ellos para defender Baviera del bolchevismo. Se impuso un bloqueo económico de Múnich y se empezó a preparar una revuelta desde el interior, en contacto con el ejército sitiador. A través de

la Wehrkraftverein fueron reclutados estudiantes de secundaria, y Heisenberg fue adscrito, de abril a junio, a un regimiento gubernamental. Sus tareas eran hacer de guía y de escribiente, transportar armas y llevar a cabo guardias en edificios y lugares estratégicos o custodiar a los prisioneros, cuyo destino no era ningún secreto: cuando a principios de mayo las tropas del Gobierno controlaron Múnich, hubo más de mil fusilamientos en juicios sumarísimos en poco menos de una semana.

«Como regla general, diría que solo se aprende en las clases donde se plantean problemas. Es esencial que los estudiantes intenten resolver problemas. [...] Limitarse a escuchar sirve de bien poco.»

— **Heisenberg, en conversaciones con el historiador T.S. Kuhn, 1963.**

Al acabar la guerra, diversos grupos juveniles propusieron una renovación de la Wehrkraftverein, alejada del carácter militar y de la tutela de los adultos en que habían estado hasta entonces, para formar los Nuevos Exploradores (en alemán, Neupfadfinder). Un grupo de alumnos del Max Gymnasium, de en torno a los catorce años, decidió organizarse según el nuevo espíritu y pidió a Heisenberg que aceptara ser su jefe. No deja de llamar la atención que esto sucediera a mediados de abril de 1919, en el cénit de la República Soviética de Baviera. A principios de agosto, más de doscientos jefes de grupos de Alemania y Austria se reunieron en un castillo medieval próximo a Ratisbona para debatir sobre la reforma del movimiento juvenil. Los reunidos estaban muy afectados por el desenlace de la guerra. De alguna manera, se sentían traicionados por sus mayores, responsables del conflicto y de la derrota, y de una sociedad dominada por la avaricia y la hipocresía, en la que el individuo desaparecía en el anonimato urbano. Propugnaban una vuelta a la naturaleza, cuyos valores fundamentales permitirían restablecer la verdad y la virtud en los individuos y en la sociedad. En muchos aspectos, defendían los valores del romanticismo alemán, con frecuentes ataques a la ciencia y al ra-





FOTO SUPERIOR:
Heisenberg sentado a bordo de un automóvil con varios miembros de su familia. En la parte delantera, además de Werner (en el centro) se encuentran su padre y su hermano Erwin.

FOTO INFERIOR:
Heisenberg, de pie a la izquierda, con su hermano Erwin y sus padres hacia el final de la Primera Guerra Mundial.

cionalismo, y adoptaban una actitud apolítica en general. Esta fue la posición de Heisenberg, aunque para él la ciencia, la música, la poesía y la filosofía se situaban en otro plano de la realidad cotidiana, y contenían una verdad eterna.

El grupo de Heisenberg compartía las ideas de los Nuevos Exploradores, pero siempre mantuvo su independencia. Hacían excursiones semanales de un día y salidas más largas durante las vacaciones. Además, organizaban reuniones, generalmente en casa de Heisenberg, dedicadas a la música, la poesía, discusiones filosóficas o partidas de ajedrez. Sobre este último punto, hay que decir que Heisenberg fue un buen ajedrecista, capaz de jugar mentalmente con sus amigos mientras caminaban por la montaña, y de reconstruir la partida a su regreso. Heisenberg estuvo al frente de su grupo hasta que se marchó de Múnich tras obtener su tesis doctoral, pero mantuvo el contacto e hizo muchas salidas con su grupo hasta que los nazis prohibieron este tipo de organizaciones. La participación de Heisenberg en los movimientos juveniles desarrolló en él un profundo sentimiento patriótico que ayuda a entender su comportamiento durante y después de la Segunda Guerra Mundial. Además, las relaciones con su grupo de exploradores influyeron en su carácter y en su actitud vital. Durante muchos años Heisenberg parecía un eterno adolescente, y tenía a menudo una actitud de *boy scout*, como a veces le decía Wolfgang Pauli en tono irónico.

En los últimos años de la guerra se suspendieron las clases durante el invierno por falta de carbón para la calefacción. Los alumnos debían trabajar en casa y solo acudían al Gymnasium para recoger y entregar los deberes. Como es de imaginar, Heisenberg estudió por su cuenta mucho más allá del nivel escolar en que estaba. Por ejemplo, aprendió cálculo infinitesimal e integral. Este tipo de cálculo se basa en unas reglas bastante sencillas, pero exige mucha práctica y resolver una gran variedad de casos para desarrollar la intuición que permite ver en seguida cómo abordar nuevos problemas.

Heisenberg se interesó por los átomos, fundamentalmente por razones filosóficas, y a ello hace referencia en el primer capítulo de sus memorias: nos referimos así a su libro *Diálogos sobre*

la física atómica. El científico alemán recuerda que su libro de física contenía unos dibujos de átomos, con ganchos y anillas para explicar una reacción química, algo que le parecía absurdo. Él pensaba que la unión de átomos para formar una molécula no ha de depender de una representación tan arbitraria como ganchos y anillas. Sin embargo, su biógrafo Cassidy afirma que el libro en cuestión no tiene ni ganchos ni anillas. Solo en una ocasión se representa la molécula de agua tal como se ve aún en nuestros días, como tres bolitas unidas por dos barras, para simbolizar los enlaces. Parece que Heisenberg aplicaba sus ideas presentes con efecto retroactivo, algo frecuente en las memorias autobiográficas. También menciona el *Timeo* de Platón, que leía en su versión griega, como parte de su actividad escolar. En ese diálogo, Platón asocia cada elemento, tierra, fuego, agua y aire, a uno de los cuatro poliedros regulares que se conocían entonces: cubo, tetraedro, icosaedro y octaedro, respectivamente. Heisenberg pensaba que todo eso eran solo especulaciones fantásticas, sin fundamento alguno, y no entendía que un pensador tan sutil como Platón creyera realmente ese tipo de cosas. Su conclusión fue que para conocer las propiedades de la materia había que conocer sus constituyentes elementales, y a eso se dedicaba ya la física atómica.

> «[...] Me fascinaba la idea de que en las partes más pequeñas de la materia se lleguen a encontrar formas matemáticas.»
>
> — Comentario de Heisenberg en su libro *Diálogos sobre la física atómica*, en referencia a su lectura de Platón en **1918**.

Heisenberg se interesó también por la teoría de la relatividad, y leyó un folleto escrito por Einstein especialmente para alumnos de secundaria. Más tarde estudió el libro de Hermann Weyl *Espacio, tiempo, materia*, publicado en 1918. Se trata de un libro de nivel muy avanzado, que presenta con detalle la relatividad general, con todos los útiles matemáticos necesarios. Pero el interés de Heisenberg por estos temas no tenía que ver

con la física, sino más bien con la filosofía; estaba entonces fascinado por la idea de que había que revisar los conceptos de espacio y de tiempo:

> Me atraía Kant y me gustaba Platón, en parte como poeta y en parte como filósofo. Pero quedé muy impresionado por la manera como Einstein planteó su teoría de la relatividad, por su idea de cambiar el concepto de tiempo, que me había preocupado mucho y que tanto me interesaba.

A finales de junio de 1920, Heisenberg hizo el examen final para obtener el certificado *(Abiturzeugnis)* que permitía el acceso a la universidad e ingresó en la Universidad de Múnich con la idea de estudiar matemáticas.

CAPÍTULO 2

La crisis de los modelos atómicos

La radiación emitida o absorbida por los átomos proporciona información sobre su estructura y propiedades. Ya en su etapa de formación universitaria, Heisenberg supo ver que los modelos atómicos existentes eran una extraña mezcla, no siempre justificada ni exenta de contradicciones, de ideas clásicas e hipótesis cuánticas.

A los pocos días del armisticio se celebró en Berlín una reunión de la Academia Prusiana de Ciencias. Por su edad y prestigio, Max Planck se había convertido en el portavoz natural de la ciencia alemana. En su intervención dijo: «[...] Hay una cosa que ningún enemigo, ni exterior ni interior, ha podido quitarnos aún: la posición que la ciencia alemana ocupa en el mundo». En su opinión, la ciencia era un exponente de la cultura alemana, y debía utilizarse como medio de recuperar la dignidad nacional. Pero la situación económica lo hacía muy difícil. Planck fue uno de los promotores de la Sociedad de Emergencia para la Ciencia Alemana, una sociedad gestionada por los propios científicos que obtenía dinero de los gobiernos central y regionales, pero sobre todo de donaciones privadas, tanto alemanas como extranjeras, con el que se financiaban becas y proyectos de investigación. En medio de este panorama, Heisenberg descubrió la física atómica y la teoría cuántica, con todas sus dificultades y contradicciones conceptuales.

ENTRE LAS MATEMÁTICAS Y LA FÍSICA

Heisenberg ingresó en octubre de 1920 en la Universidad de Múnich, donde había una creciente politización hacia la extrema de-

recha, al igual que sucedía en los medios estudiantiles alemanes en general. Su intención era dedicarse a las matemáticas y seguir una carrera análoga a la de su padre, es decir, cursar los estudios regulares, obtener el doctorado, dar clases en un Gymnasium, realizar mientras tanto la investigación adecuada para obtener la habilitación y, finalmente, conseguir una cátedra en una universidad.

Los estudios de ciencias se efectuaban en la facultad de filosofía, y para obtener el doctorado se requería haber completado seis semestres (que en realidad duraban unos cuatro meses), e integrarse en el seminario de algún profesor. Los estudiantes aceptados en estos seminarios recibían clases sobre temas especializados, se iniciaban en la investigación, preparaban artículos para ser publicados en revistas de la especialidad y, si todo iba bien, obtenían el doctorado. Normalmente, estos estudiantes estaban ya en los últimos semestres, pero, en palabras de Heisenberg: «[Yo] era muy poco modesto, y pensé que en el primer semestre ya podía ir al seminario de alguno de los profesores». Al haber estudiado por su cuenta temas avanzados, como cálculo diferencial e integral, o teoría de números, pensaba que sabía muchas matemáticas. Pero, como reconoció años más tarde, sus conocimientos eran bastante irregulares, tenía muchas lagunas e ignoraba bastantes cosas que podrían ser calificadas de elementales.

Su padre contactó con el matemático Ferdinand von Lindemann, famoso sobre todo por haber demostrado que el número pi (π = 3,14159...) es trascendente, es decir, que no es raíz de ningún polinomio con coeficientes enteros. Con esto demostró que no se puede construir, con regla y compás, un cuadrado cuya área sea igual a la de un círculo dado: la famosa cuadratura del círculo. Lindemann aceptó a regañadientes la petición de su compañero porque en realidad tenía pocas ganas de aceptar en su seminario a un estudiante primerizo. La oportunidad de deshacerse del joven importuno surgió en seguida, al preguntarle por los libros de matemáticas que había leído recientemente. Heisenberg le mencionó *Espacio, tiempo, materia*, de Hermann Weyl. Ese libro, escrito por un especialista en matemáticas aplicadas, era excelente para un físico, pero no para alguien interesado en las matemáticas puras. Lindemann le dijo que con ese tipo de

ARNOLD SOMMERFELD

Sommerfeld (1868-1951) era matemático de formación; su tesis doctoral fue dirigida en 1891 por Ferdinand von Lindemann. Trabajó con Felix Klein en Gotinga, donde obtuvo su habilitación en 1895. Tras pasar por la Universidad de Aquisgrán, en 1906 llegó a Múnich como catedrático de física teórica. Su investigación evolucionó de las matemáticas puras a las aplicadas, en particular a la hidrodinámica, pero más tarde se interesó por la espectroscopia y la teoría atómica, temas en los que su Instituto de Física Teórica se convirtió en un referente. En el año 1919 publicó el libro *Estructura atómica y líneas espectrales*, de estudio obligatorio durante muchos años para cualquier científico interesado en el tema. Pero para muchos de sus coetáneos, su cualidad fundamental fue ser un auténtico maestro. Einstein le escribió en una carta:

> Lo que admiro de usted es que ha formado a muchos jóvenes científicos de talento [...] Usted debe de tener un don para activar y enriquecer los intelectos de su audiencia.



Heisenberg hablaba de su habilidad para incitar a sus estudiantes a abordar problemas nuevos. La lista de sus estudiantes de doctorado contiene nombres que se hicieron famosos por sus contribuciones en distintos campos de la física teórica, como Debye, Pauli, Heisenberg, Ewald, Bethe, Heitler, Peierls, Feenberg o Brillouin.

lecturas ya estaba perdido para las matemáticas, y dio por acabada la entrevista.

Desconcertado, Heisenberg pensó que la física teórica sería una alternativa cercana a las matemáticas. Su padre tenía sus dudas, pues no era una especialidad de prestigio y, además, no le resultaría fácil dar clases en un Gymnasium. No obstante, hizo valer sus relaciones y le consiguió una entrevista con el profesor de física teórica Arnold Sommerfeld. Este ya estaba acostumbrado a niños prodigios, pues dos años antes había aceptado al austríaco Wolfgang Pauli, otro estudiante primerizo. Además, le

pareció muy bien que Heisenberg hubiera estudiado el libro de Weyl. Quedó satisfecho de la entrevista y le aceptó provisionalmente, a la espera de evaluarle con más detalle en su seminario.

«Solo recuerdo que di una charla muy mala, porque después Sommerfeld me dijo: "Tal vez usted se haya entendido a sí mismo, pero con seguridad no se lo ha explicado a los demás".»

— Heisenberg, en referencia a su primera intervención en el seminario de Sommerfeld. Conversaciones con el historiador T.S. Kuhn, 1963.

La física en Múnich estaba a cargo de Sommerfeld y de Wilhelm Wien. Este último llegó en 1920 como nuevo profesor de física experimental tras la jubilación de Roentgen, el descubridor de los rayos X. Heisenberg tenía que completar el número de créditos requeridos por la universidad y, entre otras materias, tenía que seguir cursos de física teórica, física experimental, astronomía, química física, teoría de funciones o geometría diferencial. Los cursos de Sommerfeld cubrían la física teórica en seis semestres: «Mecánica», «Mecánica del sólido deformable», «Electrodinámica», «Óptica», «Termodinámica y mecánica estadística» y «Ecuaciones diferenciales en derivadas parciales en física», en este orden. Si un estudiante empezaba sus estudios con el ciclo ya iniciado, tardaba más en acabarlo: se dedicaba a las otras materias en los primeros semestres y procuraba estudiar por su cuenta lo que necesitaba para seguir a Sommerfeld. Heisenberg tuvo suerte en llegar al principio del ciclo y completarlo en los seis semestres. Además de estos cursos, Heisenberg tenía que seguir los cursos especializados en el seminario de Sommerfeld y hacer los trabajos que este le asignaba.

EL INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA

En las universidades alemanas, desde la reforma impulsada por Wilhelm von Humboldt, la enseñanza era indisociable de la inves-

tigación. Cada catedrático tenía su instituto de investigación, que contaba con instalaciones, equipamiento, presupuesto, personal técnico y ayudantes de docencia e investigación. Todo ello dependía de la especialidad y del prestigio atribuido al profesor. Sommerfeld dedicaba mucho tiempo a los estudiantes de su seminario. Estos se instalaban en una gran sala del instituto para estudiar, leer, trabajar en los temas asignados y para debatir entre ellos y con el maestro. Su estrategia era que sus doctorandos se implicaran desde el primer momento en la investigación. De ese modo, trataba de motivarles y a la vez evaluaba sus capacidades. Por ejemplo, podía iniciar un debate general en la sala común a partir de un artículo científico reciente o de la carta de algún colega. A los principiantes les pedía que verificaran cálculos que él había hecho o que le corrigieran las pruebas de algún artículo. A los más avanzados les pasaba manuscritos suyos para que los revisaran, nuevos datos experimentales para que los analizaran, les planteaba algún problema o les proponía algún tema de investigación. Y todos ellos, sin excepción, tenían que exponer periódicamente sus resultados ante los demás y contestar a las preguntas y objeciones que se les plantearan. Sommerfeld tenía una habilidad especial para incitar a sus estudiantes a que abordaran problemas nuevos.

Cuando Heisenberg se incorporó al instituto, Wolfgang Pauli empezaba su quinto semestre y actuaba como segundo ayudante de Sommerfeld. Era un físico muy precoz: cuando llegó desde Viena a Múnich ya había escrito un artículo sobre relatividad general, y antes de acabar sus estudios escribió una introducción a la relatividad que todavía hoy es una buena manera de iniciarse en el tema. Heisenberg y Pauli coincidieron en el seminario de Sommerfeld solo durante dos semestres, pero fueron suficientes para fraguar una buena y duradera amistad, a pesar de tener caracteres muy diferentes. Heisenberg siempre apreció las críticas de Pauli, a pesar de su agresividad y mordacidad: «Cuántas veces le habré oído decirme: eso es una tontería».

El sistema de Sommerfeld posibilitaba que sus estudiantes destacados pudieran obtener el doctorado prácticamente a la vez que acababan sus estudios, como efectivamente hicieron Pauli y Heisenberg. Pero esta rapidez podía implicar grandes lagunas en

su formación, pues Sommerfeld daba por sentado que sus estudiantes se preocuparían de estudiar los demás temas de la física que él no enseñaba. En esto difería de su colega Wien, quien requería a sus estudiantes una formación sólida antes de llevarles poco a poco a un trabajo de investigación avanzada. Ya hemos visto que Heisenberg tenía más lagunas en matemáticas de las que creía, y veremos que sus carencias en física casi le costaron el doctorado. Cuando Heisenberg se incorporó al seminario de Sommerfeld, este llevaba varios años interesado en el estudio de los espectros atómicos y la construcción de modelos atómicos. Vamos ahora a resumir la situación con la que se encontró Heisenberg, antes de referirnos a sus propias investigaciones.

EL MODELO DE BOHR

El danés Niels Bohr se interesó en 1912 por las consecuencias del descubrimiento del núcleo atómico. Ya hemos mencionado que un modelo planetario del átomo, en el que los electrones de carga eléctrica negativa giran en torno al núcleo central, masivo, de carga positiva, es incompatible con las leyes clásicas de la electrodinámica. La estabilidad de los átomos no podía reconciliarse con las teorías clásicas de la mecánica y la electrodinámica. Para Bohr era evidente que «cualquiera que sea la modificación de las leyes del movimiento de los electrones, parece necesario introducir en las leyes en cuestión una cantidad ajena a la electrodinámica clásica; esto es, la constante de Planck». A continuación, y de manera esquemática, vamos a seguir su razonamiento.

Hay que empezar aceptando que el electrón puede estar en órbitas, a las que llamó «estacionarias», sin emitir radiación. Bohr supuso que la radiación es emitida cuando un electrón pasa de una órbita de mayor energía a otra de menor energía, o viceversa si la radiación ha sido absorbida. Si cada órbita estacionaria se identifica mediante un número entero n, escribiremos su energía como $E(n)$. Ahora hay que recordar la hipótesis de Eins-

NIELS BOHR

Bohr (1885-1962) fue un físico danés, galardonado con el premio Nobel de Física en 1922 por sus trabajos sobre la estructura y radiación de los átomos. Sin lugar a dudas, ha sido el físico más influyente en el desarrollo de la mecánica cuántica y de la física atómica. Su Instituto de Física en Copenhague se convirtió en un centro de atracción para todos los científicos interesados en estos temas. La interpretación actual de la mecánica cuántica se llama «interpretación de Copenhague», desde que así se refiriera a ella Heisenberg. Son famosas las discusiones mantenidas sobre dicha interpretación entre Bohr y Einstein, quien era contrario a las consecuencias que de ella se derivan. Niels Bohr hizo también contribuciones importantes al estudio de la estructura y propiedades de los núcleos atómicos. Heisenberg mantuvo una relación muy estrecha con Bohr, tanto a nivel científico como personal. Dicha relación se deterioró en 1941, tras la visita que Heisenberg hizo a Copenhague cuando Dinamarca estaba ocupada por los alemanes. En 1943 Bohr abandonó clandestinamente Dinamarca y, tras una breve estancia en Inglaterra, se incorporó al grupo británico que colaboró en el desarrollo de las primeras bombas atómicas en el centro de Los Álamos, en Estados Unidos.



tein sobre la luz, que hace intervenir la constante de Planck, para escribir que la energía de la radiación (igual a su frecuencia f multiplicada por la constante de Planck h), es igual a la diferencia de energías entre las dos órbitas caracterizadas por los números m y n. Es decir:

$$hf = E(m) - E(n).$$

Cabe recordar que las frecuencias del átomo de hidrógeno se reproducen mediante la relación de Rydberg-Ritz:

$$f = R\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right).$$

Al comparar ambas expresiones, se puede adivinar que las energías $E(n)$ serán proporcionales a $1/n^2$. Eso es lo que supuso Bohr, que además utilizó las ecuaciones clásicas para identificar la constante de proporcionalidad. En los libros de texto actuales se da una formulación distinta, pero equivalente, suponiendo que en las órbitas estacionarias el momento angular del electrón es un múltiplo entero de la constante de Planck h. En cualquier caso, el resultado es que Bohr pudo escribir la constante de Rydberg en términos de la masa del electrón, su carga eléctrica y, naturalmente, la constante de Planck. El valor calculado coincidía, dentro de la precisión de las medidas, con el valor experimental. Así que, mediante hipótesis razonables, aunque no justificadas, el modelo de Bohr llevaba a resultados que coincidían con los experimentos. Era un buen punto de partida para entender la estructura de los átomos. El número entero n que aparece en la fórmula de Bohr se llama número cuántico principal.

LA ESTRUCTURA FINA

En este punto intervino Sommerfeld, quien en 1916, en plena guerra mundial, se planteó la posibilidad de unas condiciones

cuánticas más generales para describir el átomo de hidrógeno. Bohr había supuesto órbitas circulares para el electrón, pero la situación más general en un modelo planetario son órbitas elípticas. Mientras que una circunferencia se caracteriza por un radio, una elipse necesita dos distancias: sus semiejes mayor y menor. Por lo tanto, pensó Sommerfeld, para describir el estado del electrón hacían falta dos números cuánticos. En su razonamiento usó el mismo número cuántico principal, n, del modelo de Bohr, que toma los valores 1, 2, 3... El otro número cuántico, al que le asignó la letra k, toma valores desde 1 hasta n; pero para seguir la notación actual utilizaremos $l = k - 1$, que toma valores desde 0 hasta $n - 1$. Y ¿cómo varía la energía del estado estacionario? Sommerfeld encontró que los estados estacionarios con el mismo valor de n y distintos valores de l tienen la misma energía, tanto si es una órbita circular como si es elíptica. En la jerga física se dice que son *estados degenerados* en el número cuántico l. Desde el punto de vista práctico, Sommerfeld no había obtenido nada nuevo.

Pero aún no había acabado su exposición, porque también consideró los efectos relativistas. Cuando las velocidades típicas de un sistema son una fracción apreciable de la velocidad de la luz —y un 1% ya es apreciable—, las expresiones de la física clásica dejan de ser válidas. Sommerfeld no resolvió rigurosamente el problema relativista, sino que se limitó a encontrar una expresión aproximada para la energía. Lo interesante es que su resultado era igual a la energía de Bohr más una corrección que depende de los dos números n y l. Es decir, los efectos relativistas rompen la degeneración anterior. La corrección depende del cuadrado de una cantidad $\alpha = e^2/(\hbar c)$, que se expresa en términos de la carga eléctrica del electrón e, la velocidad de la luz c y la constante reducida de Planck $\hbar$ (se pronuncia «hache barra», y es igual a la constante h dividida por 2π). Esta cantidad α se conoce como *constante de estructura fina*, y su valor es aproximadamente 1/137,036. La corrección relativista es muy pequeña, de unas pocas partes en cien mil, por lo que solo se observó al utilizar métodos espectroscópicos más precisos, de ahí el nombre de *estructura fina*. En resumen, la generalización de Sommerfeld introdujo un

segundo número cuántico, y permitió explicar efectos nuevos que antes no se sospechaban, lo que generó mayor confianza en este tipo de procedimiento.

Se empezaba a entender la complejidad de los espectros, pero a base de prescripciones arbitrarias. Se imponían restricciones a las leyes clásicas, sin ningún criterio general que lo justificara; no se entendía por qué un electrón no radiaba en una órbita estacionaria; se renunció a explicar qué sucedía en una transición o salto cuántico. Y había muchas preguntas sin resolver. Por ejemplo, ¿qué sucedía en un átomo con más electrones? Estos podrían situarse, todos o parte de ellos, en una órbita circular, o en órbitas concéntricas, o tal vez en órbitas que se cruzaban. No obstante, la intuición de Bohr permitió dar una primera idea del sistema periódico de los elementos. Todo este conjunto de prescripciones más o menos razonables, de mayor o menor efectividad, se llamó «vieja teoría cuántica» a partir del momento en que surgió la «nueva». De momento, veamos algunos problemas más que se le planteaban a la vieja teoría.

La construcción de nuevas redes de difracción condujo a medidas espectrales cada vez más precisas. Se puede asemejar a cuando alguien va al oculista: en el tablero luminoso cree ver una línea de cuadrados cerrados, pero con las lentes correctoras descubre que los cuadrados tienen algún lado abierto. De igual modo, al aumentar la precisión de las observaciones los espectros atómicos mostraron una estructura más complicada. Al filo de la década de 1920 se vio que algunas líneas de los espectros de los átomos alcalinos, como el sodio o el potasio, en realidad eran dobles; en el caso de los átomos alcalinotérreos, como el magnesio o el calcio, eran incluso triples. Los trabajos del español Miguel Catalán sobre los espectros del magnesio y del cromo mostraron la existencia de multipletes con cuatro, seis y hasta ocho líneas. Además, se sabía que al analizar los espectros de los elementos en presencia de un campo electrostático o bien magnético, también se desdoblaban las líneas. Así que, en realidad, Bohr solo había elaborado una primera aproximación al espectro del hidrógeno. Pero no hay duda de que fue el primer paso decisivo en la buena dirección.

MODELOS DE BOHR, SOMMERFELD Y LA ESTRUCTURA FINA

Aquí se recopilan algunas fórmulas relacionadas con el átomo de hidrógeno. La energía de un estado estacionario en el modelo de Bohr se escribe

$$-\frac{R}{n^2},$$

donde n es el número cuántico principal y R es la constante de Rydberg. Bohr dedujo la expresión

$$R=\frac{me^4}{2\hbar^2},$$

siendo m la masa del electrón, e su carga eléctrica y $\hbar$ la constante reducida de Planck.

La extensión de Sommerfeld hizo intervenir un segundo número cuántico, al que hemos designado con la letra l, que toma valores desde 1 hasta n. Con las correcciones relativistas oportunas, Sommerfeld encontró que la energía de un estado estacionario se escribe como

$$-\frac{R}{n^2}\left[1+\frac{\alpha^2}{n^2}\left(\frac{1}{l+1}-\frac{3}{4n}\right)\right],$$

donde α es la constante de estructura fina. El mayor valor de la corrección, que corresponde a los números cuánticos $n=1$ y $l=0$, resulta ser $1+\alpha^2/4$, con valor 1,000013..., es decir, la corrección es de una parte en cien mil.

EL EFECTO ZEEMAN Y EL MODELO DEL «RUMPF»

A las pocas semanas de aceptar a Heisenberg en su seminario, Sommerfeld le puso a prueba con un problema que él mismo no había podido resolver. En 1895, el holandés Pieter Zeeman (1865-1943) había observado que en presencia de un campo magnético algunas líneas espectrales originaban un triplete, con dos nuevas líneas a uno y otro lado de la original. Su separación era independiente del átomo considerado y proporcional al campo magnético aplicado. Esto pudo ser explicado mediante la física clásica, pero

lo que interesa ahora es la explicación que dio Sommerfeld con su generalización del modelo de Bohr. Un electrón en una órbita cerrada equivale a una corriente eléctrica en una espira, que a su vez origina un campo magnético (se comporta como una pequeña brújula). Este campo magnético interacciona con el campo magnético externo, y la energía de interacción depende del ángulo formado por ambos. Sommerfeld supuso que este ángulo también está sujeto a las reglas cuánticas, y solo puede tomar valores discretos, caracterizados por un número cuántico, al que llamó número magnético y representó con la letra m. Así que, en presencia de un campo magnético, las energías de los estados estacionarios dependen de tres números cuánticos: n, l, m. Después, intentó deducir las frecuencias de transición a partir de las diferencias de energías y compararlas con las líneas espectrales observadas.

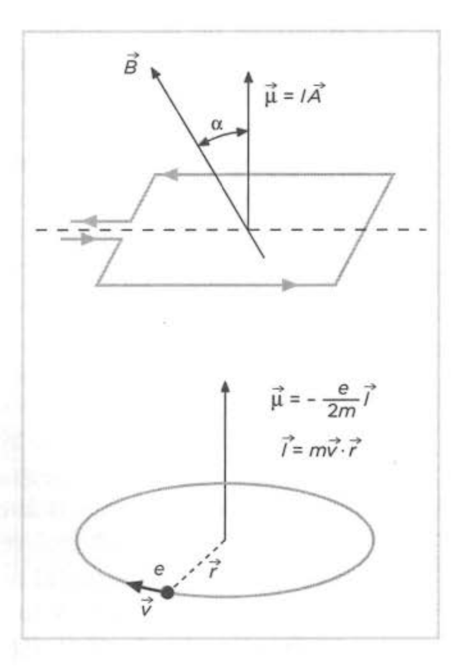
El método funcionaba bien, pero dejó de hacerlo cuando se observaron otros desdoblamientos que no solo dependían del campo magnético, sino también de la línea espectral inicial. Por eso se habló de «efecto Zeeman anómalo», para distinguirlo del efecto normal que se acaba de describir. El problema que Sommerfeld planteó a Heisenberg era precisamente el efecto Zeeman anómalo. Para el efecto normal, le bastaba con caracterizar cada estado estacionario por tres números cuánticos (n, l, m), basados en consideraciones geométricas de las órbitas. Sommerfeld había empezado a considerar la existencia de un cuarto número cuántico, al que llamó *interno*, y pretendía expresar los términos espectrales en términos de un cociente de números enteros, de manera que su diferencia reprodujera las observaciones. Después de algunos intentos sin éxito, le endosó el problema a Heisenberg, quien, a las pocas semanas de empezar sus estudios, afrontó la investigación de un problema real y nada sencillo, muy lejos de los ejercicios académicos usuales. Era un problema de actualidad, para lo que tenía que estudiar lo que se iba sabiendo de la incipiente teoría cuántica. Al mismo tiempo, tenía que adquirir los conocimientos básicos de física, necesarios para abordar la investigación propuesta.

En el mes de diciembre, Heisenberg logró un esquema que reproducía los datos experimentales. El entusiasmo inicial de

ESPIRAS ELÉCTRICAS EN CAMPOS MAGNÉTICOS

Una espira por la que circula una corriente se comporta como un dipolo magnético, es decir, como una brújula. En la figura se ha dibujado una espira rectangular (aunque la forma es irrelevante), cuya área se representa por un vector $\vec{A}$, perpendicular al plano que contiene la espira. Cuando por la espira circula una corriente de intensidad I, se define el momento dipolar de la espira como el vector $\vec{\mu}=I\vec{A}$. La energía de interacción con un campo magnético $\vec{B}$ resulta ser igual al producto escalar $-\vec{\mu}\cdot\vec{B}$, es decir, $-\mu B\cos\alpha$, siendo α el ángulo que forman los vectores $\vec{\mu}$ y $\vec{B}$. Veamos ahora el caso de un electrón que se mueve en una órbita circular de radio r con velocidad v, cuyo período de movimiento es, por tanto, $T=2\pi r/v$. El momento angular del electrón en la órbita es el vector $\vec{l}=m\vec{v}\cdot\vec{r}$, que es perpendicular al plano de la órbita. La carga eléctrica que se mueve en la órbita es equivalente a una corriente eléctrica $I=-e/T$ en una espira circular de radio r. El momento magnético es un vector perpendicular al plano de la espira. Para calcular el valor de su módulo hay que multiplicar la corriente I por el área de la espiral πr^2. El resultado es proporcional al momento angular del electrón, y se puede escribir:

$$\vec{\mu}=-\frac{e}{2m}\vec{l}.$$



Sommerfeld se enfrió cuando supo que había utilizado números cuánticos internos con valores semienteros (es decir, un número impar dividido por dos, como 1/2, 3/2, 5/2, etc.). La única cosa cierta de la teoría cuántica, dijo Sommerfeld, es que los números cuánticos son enteros y no mitades. Sin embargo, apreció el excelente acuerdo con las medidas experimentales, y en su semi-

nario se inició un largo debate sobre si los números cuánticos semienteros eran o no aceptables. El sarcástico Pauli se burlaba y decía que después de medios números enteros usaría cuartos, y luego octavos, etc. Un par de meses después, Sommerfeld recibió una carta de su antiguo ayudante Alfred Landé comunicándole que podía explicar el efecto Zeeman anómalo utilizando números cuánticos semienteros. Sommerfeld le respondió que, en su opinión, todo aquello no estaba aún maduro para ser publicado, y añadió: «Su nueva representación está en buen acuerdo con lo que ha encontrado uno de mis estudiantes (del primer semestre), pero no ha sido publicado». Tanto Heisenberg como Landé habían jugado hábilmente con números. No sabían qué podían significar esos números cuánticos semienteros, ni tenían un modelo que los justificara, pero era algo que funcionaba y permitía encontrar cierto orden en las líneas observadas. Los números cuánticos semienteros hicieron su aparición para quedarse: están relacionados con una propiedad del electrón a la que se llamó *espín*, pero durante algún tiempo fueron un nuevo quebradero de cabeza.

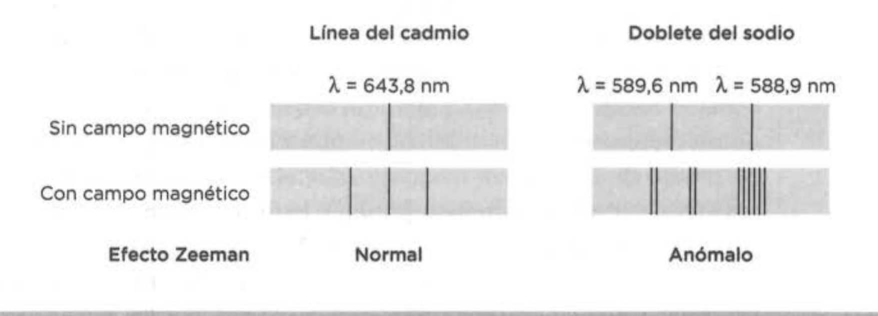
Heisenberg acabó imaginando un modelo que ahora solo tiene interés histórico. Daremos, no obstante, una breve idea del mismo, como muestra de la intuición de Heisenberg. Los electrones de valencia en un átomo son aquellos que están menos ligados; por ejemplo, en los átomos alcalinos hay un solo electrón de valencia, en los alcalinotérreos hay dos, etc. Estos electrones están orbitando en torno al resto del átomo (el núcleo atómico y los demás electrones), a lo que Heisenberg dio el nombre de *atomrumpf*, que significa algo así como «tronco del átomo». Un electrón en una órbita posee un momento angular cuyos valores, según el modelo de Bohr, son múltiplos enteros de la constante de Planck. Heisenberg consideró la energía de interacción entre la espira magnética del electrón de valencia, el momento magnético del «tronco» y el campo magnético externo, y vio que podía obtener las energías de los estados estacionarios si el electrón de valencia compartía con su «tronco» su momento angular, y así podía explicar el efecto Zeeman anómalo. Por tanto, el número cuántico semientero resultaba de repartir a partes iguales un momento an-

gular entre un electrón de valencia y el «rumpf». No había justificación alguna para este hecho, algo que Pauli no dejaba de criticarle. Pero el pragmático Heisenberg le respondía que el éxito justifica los medios.

Sommerfeld dio su visto bueno al modelo, pues, a pesar de las dificultades conceptuales, fue durante unos años el único modelo disponible para entender los resultados. A finales de 1921 Heisenberg escribió un artículo con esos resultados y lo envió a una revista científica. Sommerfeld se lo contó a Einstein en una carta: «Un discípulo mío (Heisenberg, ¡tercer semestre!) ha interpretado estas leyes y las del efecto Zeeman anómalo utilizando un modelo ("Zeitschrift für Physik", en prensa). Todo funciona bien, pero su sentido más profundo aún permanece en la oscuridad». Un eufemismo para decir que seguían sin entender el fondo de las cosas.

CAMPO MAGNÉTICO Y EFECTO ZEEMAN

En la figura se muestra el efecto de un campo magnético sobre las líneas espectrales. Como ejemplo del efecto Zeeman normal tenemos el caso del cadmio. La línea original da origen a dos líneas adicionales, dispuestas simétricamente respecto a ella. La situación es más compleja en el caso del sodio. Vemos que una línea puede dar origen a cuatro o a seis líneas, dispuestas simétricamente respecto a las líneas originales. Este es el efecto Zeeman anómalo, que no pudo ser explicado hasta que se tuvo en cuenta el espín de los electrones.



EL FESTIVAL BOHR

En junio de 1922, Max Born (1882-1970) organizó en Gotinga un encuentro con Bohr al que acudió un gran número de físicos alemanes. La reunión fue importante por razones tanto científicas como políticas. Durante varios años después de la guerra, los científicos de los países «perdedores» se vieron sometidos a un boicot por parte de los «vencedores»; Francia y Bélgica fueron especialmente intransigentes en ese boicot. El aislamiento es algo perjudicial para la ciencia, y los científicos alemanes solo tenían la posibilidad de acudir a congresos convocados por países que habían permanecido neutrales durante la contienda. La visita de Bohr contribuía, por tanto, a romper ese boicot, y los físicos alemanes pudieron debatir sobre cuestiones de física atómica y teoría cuántica con la figura más importante del momento. Sommerfeld acudió a Gotinga acompañado de Heisenberg y de otros estudiantes a su cargo. Este encuentro coincidió con el primer Festival Haendel («Händel Festpiele»), una serie de conciertos y actividades en torno a la figura del compositor, que se sigue celebrando todos los años en varias ciudades alemanas; por ello, entre los científicos se le dio el nombre de *Festival Bohr*.

A lo largo de dos semanas, Bohr presentó de forma sistemática la situación de la física atómica, detalló los problemas planteados y esbozó posibles soluciones. Lo que había que hacer era definir las reglas cuánticas y aplicarlas consistentemente. Por eso, cuando mencionó el modelo «rumpf» de Heisenberg, lo hizo sin mucho entusiasmo, pues a pesar de sus logros las hipótesis no se podían justificar. Bohr presentó en una de las charlas el trabajo que Kramers, un colaborador suyo, había hecho sobre el efecto Stark —así se llama a la separación de las líneas espectrales en presencia de un campo eléctrico externo—. Heisenberg ya había estudiado el trabajo de Kramers, e intervino al acabar la charla de Bohr para expresar varias críticas a ese trabajo, lo que no dejó de causar una gran sorpresa en la audiencia: un estudiante, que aún no había acabado sus estudios, se atrevía a criticar a un colaborador del gran maestro. Pero las críticas eran pertinentes y, al acabar la charla, Bohr propuso a Heisenberg dar un paseo por los alrededores para

seguir la discusión. Años después, Heisenberg recordaba que en aquella conversación salieron a relucir en seguida sus temas de discusión preferidos años antes: preguntas filosóficas sobre los átomos, uso de conceptos familiares para describirlos o la naturaleza precisa de un «entendimiento» consistente en física. El efecto fue grande y duradero, y el encuentro tuvo un papel decisivo en la vida futura de Heisenberg.

> «Este paseo ejerció una enorme influencia sobre mi posterior vida científica, o tal vez sea más exacto decir que mi evolución científica se inició en este paseo.»
>
> — Heisenberg, en su libro *Diálogos sobre la física atómica*, sobre su primer paseo con Bohr en Gotinga, 1923.

Sommerfeld tenía previsto pasar el curso académico 1922-1923 como profesor invitado en la Universidad de Wisconsin, Estados Unidos. Convino con Born que varios estudiantes suyos irían a Gotinga durante un semestre para seguir sus estudios y para trabajar en los temas de investigación que tenían asignados. Heisenberg tenía que empezar su tesis doctoral, para la que Sommerfeld le planteó un problema nada sencillo sobre hidrodinámica, que nada tenía que ver con la física atómica.

PRIMERA ESTANCIA EN GOTINGA

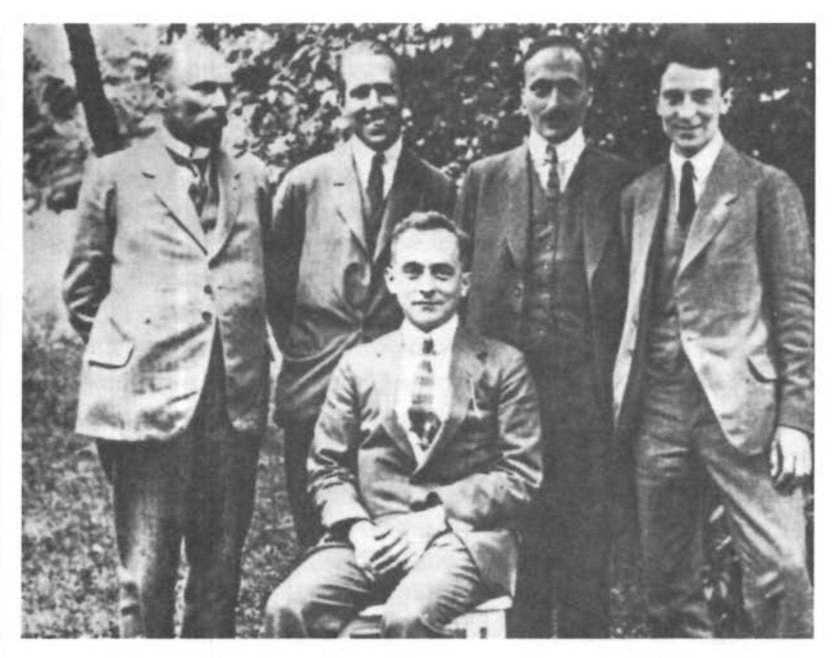
La Universidad de Gotinga era famosa sobre todo por su tradición matemática, con profesores como Gauss, Riemann o Klein. Cuando Max Born fue nombrado profesor de Física Teórica en 1921, la universidad tenía los institutos de Matemáticas, Matemáticas Aplicadas y Mecánica de Física Experimental, con científicos de enorme prestigio como Hilbert, Courant, Runge, Prandtl, Pohl y Franck. Born sentó las bases de su programa de investigación pocos días después del Festival Bohr, y, en un breve artículo escribió:

> Tal vez ha pasado el tiempo en que se daba rienda suelta a la imaginación del investigador para idear modelos de átomos y moléculas a voluntad. Ahora estamos más bien en situación de construir modelos con cierta seguridad, aunque todavía no completa, mediante la aplicación de las reglas cuánticas.

Born se puso manos a la obra inmediatamente con su nuevo ayudante Pauli, cuya presencia fue efímera, pues solo estuvo un semestre en Gotinga.

El modelo de Bohr solo funciona bien cuando se aplica al caso más simple con dos partículas, como el átomo de hidrógeno —un núcleo con una carga positiva y un electrón— o el átomo ionizado de helio —un núcleo con dos cargas positivas y un electrón—. De manera general, las órbitas se pueden determinar exactamente en el problema de dos cuerpos, pero no a partir de tres o más cuerpos. Además, había preguntas sin una respuesta satisfactoria: ¿cómo se explica el sistema periódico de los elementos? ¿Por qué los electrones no ocupan la órbita de menor energía en todos los átomos? En su tesis doctoral, Pauli había abordado un problema que parecía sencillo: la molécula de hidrógeno ionizada —dos núcleos con una carga positiva y un electrón—. Pensó que una buena aproximación sería suponer que los dos núcleos permanecieran en posiciones fijas, de manera que en realidad consideró dos sistemas imbricados de dos cuerpos. Todo parecía muy razonable, pero no servía para nada, ya que los resultados finales no se correspondían con las líneas espectrales observadas.

Born se propuso establecer una nueva teoría cuántica, calculando las órbitas de forma rigurosa según lo que se sabía de astronomía, y aplicando las reglas cuánticas de manera consistente. Durante el siglo XIX se desarrolló en astronomía la teoría de perturbaciones. Según dicha teoría, para calcular las órbitas planetarias en el sistema solar, se resuelve primero el movimiento de cada uno de los planetas en torno al Sol, ignorando la atracción con los demás, algo razonable porque en comparación con la del Sol, estas atracciones son mucho más pequeñas. Se considera que perturban las órbitas previamente calculadas, lo que se incorpora al cálculo como una serie de correcciones progresivas. El método es muy





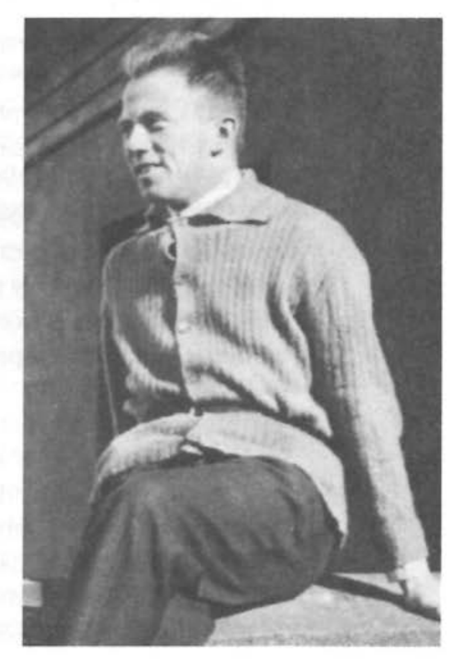


FOTO SUPERIOR:
Festival Bohr, organizado en Gotinga en junio de 1922. De izquierda a derecha: Carl Wilhelm Oseen, Niels Bohr, James Franck y Oskar Klein; sentado: Max Born.

FOTO INFERIOR IZQUIERDA:
Einstein junto al físico experimental Pieter Zeeman (a la izquierda de la imagen) y su amigo Paul Ehrenfest, hacia 1920.

FOTO INFERIOR DERECHA:
Heisenberg hacia 1924, cuando ya era doctor por la Universidad de Múnich.

fructífero, pues permitió, por ejemplo, predecir la existencia del planeta Neptuno a partir de las pequeñas irregularidades observadas en la órbita de Urano. Born confiaba en que siguiendo estos métodos de la mecánica celeste podría descartar los elementos superfluos y poner de manifiesto los necesarios para la nueva teoría.

«Heisenberg tiene por lo menos tanto talento como Pauli, pero personalmente es más amistoso y agradable. También toca muy bien el piano.»

— En una carta de Born a Einstein escrita en abril de 1923.

Heisenberg llegó a Gotinga a finales de octubre de 1922. Es famosa la descripción que Born hizo de él: «[Parecía] un simple campesino, de pelo corto y rubio, brillantes ojos claros y una expresión encantadora». En los institutos de la universidad tenían lugar reuniones periódicas, en las que visitantes y locales exponían sus trabajos recientes. El ambiente era bastante informal, y se podía interrumpir al orador para aplaudirle un buen resultado, para pedirle aclaraciones o para hacerle críticas despiadadas. Heisenberg presentó sus trabajos con Sommerfeld y su modelo «rumpf». Los asistentes ya lo conocían, e incluso muchos estaban al tanto de las críticas de Bohr. Sin embargo, Heisenberg hizo una brillante exposición que mereció un aplauso general. En enero de 1923 Born escribió a Sommerfeld: «Estoy muy orgulloso de Heisenberg, es muy apreciado y considerado por todos nosotros. Su talento es increíble [...]». Y añadió que tenía un buen carácter, algo tímido pero agradable, destacando su disponibilidad y entusiasmo.

Heisenberg tardó en apreciar el programa de Born. Todos los lunes por la tarde, el grupo de estudiantes avanzados se reunía en casa de Born para estudiar mecánica celeste y teoría de perturbaciones. Heisenberg pensaba que se daba más importancia a las matemáticas que a la física, algo alejado de la versión intuitiva de Sommerfeld, que ya había asimilado y apropiado. Pero ya a finales de noviembre podía escribir a su padre: «Personalmente Gotinga

tiene para mí la gran ventaja de que aprenderé de una vez y correctamente matemáticas y astronomía». Estas sesiones acababan de manera informal, y a menudo Born y Heisenberg tocaban el piano, alternativamente o a cuatro manos. Born estaba tan satisfecho con Heisenberg que escribió a Sommerfeld para proponerle que, después de su tesis, Heisenberg volviera a Gotinga para preparar allí su habilitación y convertirse en su colaborador.

En febrero de 1923 a Heisenberg se le ocurrió una idea para verificar hasta qué punto se podía aplicar la mecánica clásica. Se trataba de considerar el átomo de helio con uno de sus electrones en una órbita muy excitada, es decir, un núcleo con un electrón cercano y el otro en una órbita muy alejada. Su idea era que podría considerarse como un átomo de hidrógeno muy excitado cuyo núcleo está perturbado por un electrón próximo. Pero aquello no funcionaba, y en uno de sus pocos momentos de pesimismo escribió a su amigo Pauli: «Todos los modelos actuales del helio son tan malos como lo es la física atómica».

En el verano de 1923, Bohr, Pauli, Born y Heisenberg estaban dispuestos a aceptar lo inevitable. Los fallos obvios de todos los modelos cuánticos para los átomos y moléculas más sencillos, aparte del átomo de hidrógeno, demostraban claramente, en palabras de Born, «que no solo se necesitan nuevas hipótesis en el sentido usual de hipótesis físicas, sino que todo el sistema de conceptos físicos debe ser reconstruido desde sus bases». Born proclamó que ya era hora de buscar una nueva teoría, a la que dio el nombre de *mecánica cuántica*.

UN DOCTORADO POR LOS PELOS

En mayo de 1923, Heisenberg volvió a Múnich para acabar sus estudios y preparar su tesis doctoral. Hasta entonces había descuidado los cursos generales de Wien sobre física experimental. En su momento, Pauli había seguido dos cursos, uno de cuatro horas semanales y otro de ocho horas. Pero Heisenberg no mostró demasiado entusiasmo por la física experimental, y solo siguió el

curso más corto. Su mayor interés estaba en el curso de Sommerfeld sobre ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, que era precisamente lo que necesitaba para su trabajo de tesis. A petición de la compañía de aguas de Múnich, Sommerfeld había hecho un estudio experimental sobre el movimiento del agua en una canalización. El trabajo de tesis de Heisenberg consistía en hacer un estudio teórico para determinar la transición del régimen laminar al turbulento, que es cuando se forman remolinos. En 1880, el inglés Reynolds había encontrado de manera empírica que esta transición está regida por una combinación de la densidad y la viscosidad del líquido, de su velocidad en la conducción y de las características geométricas de esta. Cuando las condiciones son tales que dicha combinación supera cierto valor, el líquido circula en régimen turbulento. Heisenberg tenía que resolver las ecuaciones fundamentales de la hidrodinámica, que determinan el movimiento de fluidos, y consiguió verificar los resultados de Reynolds usando varias aproximaciones y simplificaciones ingeniosas.

Para obtener el grado de doctor había que superar dos pruebas. La primera era presentar el trabajo de investigación y responder a las preguntas de los examinadores, algo que Heisenberg hizo sin dificultad. Sommerfeld redactó el informe correspondiente, y en él insistió más en las cualidades de Heisenberg que en las del propio trabajo, con frases como «muestra una vez más su extraordinaria capacidad: un completo dominio del aparato matemático y una audaz visión física», o «no habría propuesto un tema de esta dificultad a ningún otro de mis discípulos».

La segunda prueba consistía en un examen oral, llamado *rigorosum*, una especie de reválida sobre los conocimientos generales del candidato. Antes del examen, Wien le había pedido que hiciera un experimento en su laboratorio: medir la estructura hiperfina en el efecto Zeeman del mercurio utilizando un interferómetro de Fabry-Perot. Como su nombre hace suponer, la estructura hiperfina se refiere a una separación de líneas más estrecha que la fina; más tarde se mostró que se debe a la interacción magnética de los electrones con el núcleo. Heisenberg hizo un trabajo muy flojo, que no dejó satisfecho a Wien. No entró a fondo en el significado del experimento y, por ejemplo, ni siquiera pensó en

fotografiar el espectro para hacer mejor las medidas. El examen tuvo lugar a finales de julio de 1923. Heisenberg obtuvo la máxima nota en física teórica y en matemáticas, la calificación siguiente inferior en astronomía, pero un rotundo suspenso en física experimental. Fue incapaz de responder a las preguntas de Wien: no supo explicar el poder de resolución de un interferómetro Fabry-Perot, ni el de un telescopio o de un microscopio, asuntos que Wien había explicado en su curso y que se suponía que debía conocer después del trabajo experimental previo. Ni siquiera supo explicar el funcionamiento de una batería eléctrica. Después de una larga y tensa discusión entre los examinadores decidieron aprobarle con la nota mínima.

Este resultado fue una humillación para el niño prodigio. Esa misma noche, en vez de celebrar su doctorado con Sommerfeld y los demás estudiantes, Heisenberg tomó un tren hacia Gotinga. Estaba ansioso de saber si, a pesar del mal resultado, Born seguía aceptándole como su ayudante. Tras escuchar los detalles del examen, Born le dijo que no veía razón para cambiar de planes. Aliviado por esta reacción, Heisenberg se fue de vacaciones a Finlandia, con su grupo de exploradores, donde pasó todo el mes de agosto. En octubre de 1923, volvió a Gotinga como ayudante de Born y realizó los trabajos de investigación necesarios para obtener su habilitación.

CAPÍTULO 3

La incertidumbre cuántica

Los problemas relacionados con la física atómica y la teoría cuántica desaparecieron de repente entre 1925 y 1927. El joven Heisenberg dio el primer paso para construir la mecánica cuántica, la esperada teoría que permitió entender los fenómenos atómicos. Heisenberg obtuvo las famosas relaciones de indeterminación, su logro más conocido fuera del ámbito de la física. Al mismo tiempo que la mecánica cuántica surgieron los problemas filosóficos relacionados con su interpretación.

La llegada de Heisenberg a Gotinga coincidió con una inflación desbocada en Alemania. Por ejemplo, entre enero y noviembre de 1923 el cambio del dólar estadounidense pasó de 17792 marcos por dólar a la astronómica cifra de 4,2 billones de marcos por dólar. Los sueldos se pagaban cada dos días, y se invertían en seguida en comprar alimentos o cualquier producto que pudiera cambiarse por alimentos más adelante. La Sociedad de Emergencia para la Ciencia Alemana tuvo un papel esencial para mantener y avanzar la ciencia alemana en esas condiciones. Por ejemplo, su Comisión de Electrofísica consiguió donaciones de la compañía estadounidense General Electric, no solo para proyectos técnicos y experimentales relacionados con la electricidad, sino también para la investigación en física atómica y teoría cuántica. En su informe de 1926 se escribía:

> Como es bien sabido, la mecánica cuántica está en el centro de atención de físicos de todas las naciones. El trabajo de Heisenberg y de Born, que ha sido apoyado por el Comité de Electrofísica y sin el cual muy probablemente dicho trabajo no habría sido realizado en Alemania, sino en otro lugar, ha mostrado la utilidad del Comité de Electrofísica en el desarrollo de la física en Alemania.

Así, se puede decir que, sin saberlo, General Electric financió el nacimiento de la mecánica cuántica.

En este capítulo vamos a tratar ese nacimiento, o más exactamente nacimientos, pues en pocos meses surgieron varias formulaciones equivalentes de la mecánica. El período histórico discurre entre 1923 y 1927, durante el cual Heisenberg estuvo alternativamente en Gotinga, con Born, y en Copenhague, con Bohr. Durante ese tiempo, su vida fuera de la física se limitaba a episódicas visitas a sus padres en Múnich y, sobre todo, a contactos y salidas con su grupo de exploradores, con quienes pasaba sus vacaciones, viajando por diversos lugares de Europa.

ENTRE GOTINGA Y COPENHAGUE

En septiembre de 1923, Heisenberg llegó a Gotinga como ayudante de Born, con el objetivo de obtener su habilitación. La financiación de la Sociedad de Emergencia no cubría todas las necesidades, y los profesores de universidad se veían obligados a buscar por su cuenta salarios y estipendios para sus ayudantes y estudiantes de doctorado. Born obtenía ayudas de un industrial alemán, Carl Still, aficionado a las matemáticas y a la física, y de un banquero estadounidense, Henry Goldman (el fundador de Goldman Sachs).

Born proseguía su proyecto de investigación basado en los resultados rigurosos de la mecánica celeste, que Heisenberg ya conocía pero le costaba apreciar. Recordemos que había inventado el modelo «rumpf» para explicar la división de ciertas líneas espectroscópicas en dobletes y tripletes. Pues bien, cuando aparecieron nuevas subdivisiones de líneas espectrales, el siempre ingenioso Heisenberg encontró un esquema para reproducirlas, introduciendo lo que él llamaba *principio de Zeeman ad hoc*, que en este caso sería una manera culta de decir «a martillazos». En este punto, conviene dejar claro cómo se hacían las cosas en el contexto de la vieja teoría cuántica. Para poner orden en el rompecabezas de las líneas espectrales, se llevaba a cabo una tarea semejante a la de zoólogos o botánicos cuando organizan y clasifican especies. En ausencia de una teoría atómica consis-

tente, la organización de los datos espectrales pasaba por el uso de reglas semiempíricas que tienen mucho de bricolaje. Eso es lo que hizo Heisenberg: mezclar energías continuas y saltos discontinuos entre estados, con unas reglas bastante arbitrarias que no respondían a un esquema teórico general. Los métodos de Born eran muy distintos: pretendía basarse en la mecánica celeste, pero tampoco conseguía logros reales. La situación en física atómica y teoría cuántica seguía estancada.

En el mes de marzo de 1924, Heisenberg visitó a Bohr durante unas semanas. El Instituto de Física Teórica de Copenhague había sido inaugurado dos años antes, financiado por el Gobierno danés y la Fundación Carlsberg. Durante su estancia, Heisenberg mantuvo muchas y muy largas conversaciones con Bohr.

> «Bohr es el primer científico que también produce una fuerte impresión como persona. Siempre hace críticas positivas [...] no es solo un físico, sino mucho más.»
>
> — HEISENBERG EN UNA CARTA A SUS PADRES.

El resto del tiempo lo pasaba en la biblioteca estudiando libros de física «para elevar mi educación general en física», como decía a sus padres. La visita coincidió con un período en el que Bohr estaba dispuesto a rechazar incluso puntales tan básicos de la física como la ley de causalidad o las leyes de conservación de la energía y el momento, sugiriendo que tal vez a escala atómica las cosas fueran distintas. Curiosamente, Bohr tardó en aceptar la hipótesis de Einstein sobre los cuantos de luz, confirmada en 1923 por los experimentos del estadounidense Compton. Este demostró que las interacciones entre la luz y un electrón se explican exactamente como si se tratara de la colisión entre dos bolas de billar. A pesar de ello, Bohr elaboró un modelo —conocido como BKS, por el nombre de sus tres autores, Bohr, Kramers y Slater— en el que explícitamente no se cumplían estas leyes fundamentales. Suponían que solo se cumplirían en promedio, tras efectuar un gran número de colisiones. Pero el modelo BKS

fue refutado en 1925, cuando en varios experimentos se demostró que dichas leyes se cumplen en las colisiones individuales entre un fotón y un electrón.

Heisenberg siguió de cerca el desarrollo de este modelo, lo discutió con sus autores y, sobre todo, se imbuyó de las ideas físicas de Bohr. A su regreso a Gotinga se dedicó a escribir su memoria de habilitación, basada en su modelo Zeeman ad hoc. En julio de 1924 recibió el certificado que le facultaba para ocupar una plaza de profesor en cualquier universidad alemana —solo tenía veintidós años—. Al día siguiente, como de costumbre, se fue de vacaciones con su grupo de exploradores.

Bohr insistió en que Heisenberg volviera a Copenhague, para lo que le consiguió financiación de la Fundación Rockefeller por un año. Como Born necesitaba que Heisenberg estuviera en Gotinga durante el segundo semestre, la estancia se dividió en dos períodos. Al empezar el primero de ellos, Heisenberg se encontró con el problema de la lengua, pues no hablaba danés y muy poco inglés. En la casa donde alquiló una habitación había otro huésped, un químico estadounidense, con un problema parecido: no hablaba danés y muy poco alemán. Afortunadamente para ambos, la dueña de la casa era trilingüe y aceptó que las comidas en su casa fueran también clases de idiomas.

En aquella época Bohr estaba muy absorbido por su *principio de correspondencia*, que relaciona propiedades cuánticas de átomos con su contrapartida clásica en ciertas condiciones. Heisenberg empezó a trabajar con Kramers, el colaborador más próximo de Bohr. Kramers sugería que el átomo podría considerarse como un conjunto de osciladores virtuales, caracterizados por las frecuencias que aparecen en las transiciones atómicas. Es como si se quisiera describir un instrumento musical desconocido, por ejemplo una guitarra, por parte de alguien no familiarizado con su sonido, como el conjunto de todas las posibles notas que pueda producir al apoyar en todos y cada uno de los trastes e incluso variando la posición del puente. Parece una simpleza para describir una guitarra, pero la idea de osciladores virtuales permitió a Heisenberg y a Kramers sacar alguna idea para describir el átomo. En enero de 1925 escribieron esto: «En particular, obten-

dremos, de forma muy natural, fórmulas que contienen solo las frecuencias y amplitudes características para las transiciones, mientras que desaparecerán todos los símbolos que se refieren a la teoría matemática de sistemas periódicos». Con esta frase algo oscura querían subrayar la necesidad de alejarse de modelos intuitivos y concentrarse solo en aquellas magnitudes que pudieran ser observadas en el laboratorio.

> «Siempre me gustó el principio de correspondencia de Bohr porque daba esa falta de rigidez, esa flexibilidad en las imágenes, que podía llevar a esquemas matemáticos reales.»
>
> — Conversaciones con el historiador de la ciencia **T.S. Kuhn, 1963.**

Heisenberg dejó Copenhague con un espíritu muy optimista, pues había concebido unas vagas ideas que en su opinión iban a llevarle a la nueva teoría. En contraste, Pauli se mostraba muy pesimista. Aproximadamente sobre las mismas fechas, escribía a un amigo: «La física [...] es demasiado difícil para mí, y me gustaría haber sido actor de cine o algo parecido y no haber oído hablar nunca de física. Ahora espero que Bohr nos salvará a todos con una nueva idea». Pero Bohr no intervino en esta operación de salvamento, que fue realizada por Heisenberg y por Schrödinger (1887-1961), desde distintos puntos de partida.

PRIMER NACIMIENTO DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

A finales de abril de 1925, después de dos semanas de vacaciones con sus exploradores, Heisenberg regresó a Gotinga dispuesto a concretar sus vagas ideas. Su intención inicial era abordar el átomo de hidrógeno, pero incluso este átomo era demasiado complicado para plasmar unas ideas aún imprecisas, así que consideró algunos sistemas más sencillos, entre ellos el oscilador armónico. Un péndulo o un peso suspendido de un muelle son ejemplo de un

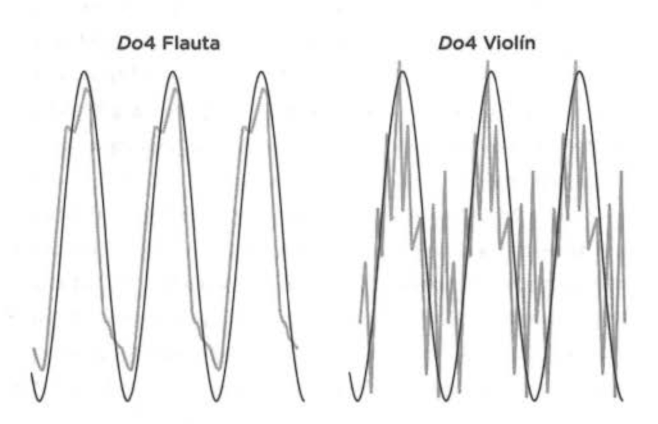
oscilador armónico. Al estirar un poco el muelle, hay una fuerza recuperadora que tiende a que el peso vuelva a su posición de reposo; esta fuerza es proporcional a la distancia de separación de la posición de equilibrio. Cualquier sistema se comporta como un oscilador armónico cuando se separa muy poco de su posición de equilibrio, y por eso es tan importante para los físicos considerar este sistema, que los estudiantes de física analizan de mil modos distintos.

Cuando Heisenberg avanzaba en su trabajo, tuvo una reacción alérgica al polen y a primeros de junio se marchó a recuperarse a la isla de Helgoland, en el mar del Norte, en la que los fuertes vientos impiden el desarrollo de la vegetación. Durante un par de semanas se dedicó de manera intensiva a desarrollar sus ideas, con alguna interrupción para pasear por la isla o para leer poesías de Goethe. Había algo que le preocupaba, y es que con las condiciones que se había impuesto no podía estar seguro de si se cumplía o no la conservación de la energía; tenía que completar sus cálculos para saberlo. «[...] Eran cerca de las tres de la madrugada cuando el resultado final del cálculo estaba ante mí». Supo así que su esquema era consistente, pero estaba tan excitado que no podía dormir. Salió de la casa y, sentado frente al mar, se tranquilizó esperando el amanecer. Antes de que acabara el mes de julio, la redacción de la revista *Zeitschrift für Physik* recibió su manuscrito, con el título «Sobre una reinterpretación cuántica de relaciones cinemáticas y mecánicas». Su objetivo era establecer las bases de la mecánica cuántica, basándose «exclusivamente en relaciones entre magnitudes que sean en principio observables».

De manera esquemática, a continuación se expone la idea básica de su razonamiento. Hablar de trayectoria clásica de una partícula significa especificar su posición x en cada instante de tiempo t, lo que se escribe como $x(t)$. En el caso de una órbita electrónica, esta trayectoria es periódica, y un movimiento periódico se puede escribir matemáticamente como una serie de Fourier. Se trata de una suma de términos del tipo oscilador armónico, que escribiremos como $x_n(t)$, cuyas frecuencias son múltiplos enteros de una frecuencia fundamental. Si se analiza el sonido de un instrumento musical con una serie de Fourier, el

INSTRUMENTOS MUSICALES Y SERIE DE FOURIER

Normalmente, cualquiera puede distinguir por su sonido una flauta de un violín, aunque hagan sonar la misma nota, por ejemplo el *Do*4 (llamado también *Do* central, usado como referencia en la mayoría de instrumentos), que tiene una frecuencia de 261,6 Hz. En lenguaje musical se dice que estos sonidos tienen distinto timbre, aunque su tono (la frecuencia) y su intensidad sean iguales. En la figura se comparan los sonidos producidos por una flauta y un violín (en gris) al dar la misma nota. Se ha superpuesto una onda pura (en negro) producida por un diapasón con la frecuencia del *Do*4.



Vemos que el sonido de la flauta se parece bastante al de una onda pura —y no es casualidad que se atribuya a este instrumento sonidos más puros—, mientras que el de un violín es más complejo. Las ondas producidas por un instrumento contienen una superposición de armónicos, cuyas frecuencias son múltiplo de la frecuencia fundamental que corresponde al tono del sonido. La determinación de las intensidades de los armónicos que intervienen en una onda sonora dada se conoce como *análisis de Fourier*.

número entero n indica el armónico correspondiente, y además de la frecuencia del sonido fundamental se incluyen todos sus armónicos, todas sus octavas.

Para escribir la magnitud equivalente en mecánica cuántica —pensó Heisenberg— no basta un único número entero, pues las

frecuencias observadas corresponden a la transición entre dos estados cuánticos. Para simplificar, caractericemos cada estado con un solo número cuántico n. Entonces, el equivalente a la serie de Fourier clásica corresponderá a una suma con dos índices, una doble suma con términos del tipo $x_{mn}(t)$. Es decir, para dar la posición del electrón en cada instante se hace necesario especificar en cada instante de tiempo un tablero cuadrado de números, tantos por lado como estados atómicos existan. Heisenberg supuso además que esta nueva magnitud cuántica debía satisfacer las mismas ecuaciones que su análoga en la física clásica, como por ejemplo la ley de Newton —fuerza igual a masa por aceleración—, o cualquier otra formulación equivalente. En los casos sencillos que consideró pudo obtener las expresiones para las amplitudes correspondientes a las cantidades $x_{mn}(t)$ y obtener las expresiones cuánticas para la energía de los estados estacionarios.

Todo parecía encajar, pero Heisenberg aún no estaba seguro de si había obtenido la solución que todos andaban buscando o si se trataba de una solemne tontería, pues había necesitado suponer una extraña propiedad relacionada con el producto de dos cantidades $x(t)$ e $y(t)$. ¿Cómo escribir el tablero de números del producto en términos de los tableros de números de cada factor? Heisenberg lo escribió como

$$[x(t)\,y(t)]_{mn} = x_{m1}(t)\,y_{1n}(t) + x_{m2}(t)\,y_{2n}(t) + x_{m3}(t)\,y_{3n}(t) + \ldots$$

Según él, el problema es que «mientras que en la teoría clásica $x(t)y(t)$ es siempre igual a $y(t)\,x(t)$, esto no sucede necesariamente en la teoría cuántica». A pesar de esta extraña propiedad, redactó un manuscrito con sus ideas, cálculos y resultados. Se lo pasó a Born y le pidió que, si estaba de acuerdo con su contenido, lo mandara a publicar. Heisenberg iniciaba inmediatamente un largo viaje: conferencias en Holanda e Inglaterra, vacaciones a Escandinavia con sus exploradores y, finalmente, la segunda parte de su estancia en Copenhague.

Born se quedó perplejo por la extraña regla de multiplicación que se había inventado Heisenberg. Lo estuvo pensando du-

rante unos días, hasta que cayó en la cuenta de que se trataba de algo que él ya conocía desde su época de estudiante de matemáticas: los tableros de Heisenberg correspondían a lo que en lenguaje matemático se llaman matrices, cuyo producto no conmuta en general. Después de convencerse de que lo que había hecho Heisenberg era el paso correcto, envió el artículo a la revista *Zeitschrift für Physik*, que lo publicó en el número de septiembre del año 1925.

Inmediatamente, junto con su nuevo ayudante Pascual Jordan, se puso a escribir en lenguaje matricial lo que había planteado Heisenberg, para elaborar «una teoría sistemática de la mecánica cuántica». Escribieron un largo artículo para explicar los métodos matriciales y adaptarlos a la física cuántica; reinterpretaron cualquier variable o función de la mecánica clásica como una correspondiente matriz cuántica, y encontraron el análogo matricial de casi todas las ecuaciones previas. Además, a partir de las correspondientes expresiones matriciales abstractas, obtuvieron las energías de los estados estacionarios. Todo ello les permitía «esperar que esta teoría abarcará realmente leyes físicas bien asentadas». Born y Jordan encontraron una relación muy curiosa entre las matrices correspondientes a la posición y al momento de una partícula. El momento, recordemos, es el producto de su masa por su velocidad, y en las formulaciones avanzadas de la mecánica clásica su uso es más conveniente que el de la velocidad. Usualmente estas magnitudes se representan mediante las letras q —en vez de x, como se ha escrito antes— y p, respectivamente. Usando las letras mayúsculas para las respectivas matrices, la relación encontrada por Born y Jordan se escribe:

$$Q \cdot P - P \cdot Q = i\hbar I,$$

siendo $i = \sqrt{-1}$ la unidad de los números imaginarios, $\hbar = h/2\pi$ es la constante reducida de Planck, e I la matriz unidad; un tablero cuyos elementos son iguales a uno si los dos subíndices son iguales, y nulos en caso contrario. Lo curioso de esta expresión está en la presencia del número i: un invento de los matemáticos del siglo XIX, como Cauchy y Gauss, utilizado a veces en física para

MATRICES

Una matriz es un tablero de números que se clasifican con dos índices, el primero para indicar la fila a la que pertenece, y el segundo, la columna. Por ejemplo, una matriz cuadrada con dos filas y dos columnas corresponde al tablero

$$C = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{pmatrix}.$$

La suma y la resta de matrices son bastante intuitivas: se obtiene otra matriz cuyos elementos son suma o resta de los elementos de las dos matrices iniciales. Sin embargo, las matrices tienen una regla de multiplicación particular:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11}b_{11} + a_{12}b_{21} & a_{11}b_{12} + a_{12}b_{22} \\ a_{21}b_{11} + a_{22}b_{21} & a_{21}b_{12} + a_{22}b_{22} \end{pmatrix}.$$

Con esta regla de multiplicación, el orden de los factores sí que altera, en general, el producto. Por ejemplo, con las matrices

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \text{ y } B = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

se obtienen los productos

$$A \cdot B = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \text{ y } B \cdot A = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix},$$

que son matrices distintas. La diferencia de estos productos es la matriz

$$A \cdot B - B \cdot A = \begin{pmatrix} 0 & 2 \\ -2 & 0 \end{pmatrix}.$$

En general, las matrices que aparecen en mecánica cuántica son matrices cuadradas, pero tienen dimensiones infinitas, es decir, un número infinito pero discreto de filas y de columnas.

simplificar algunos cálculos formales, que apareció aquí sin que nadie lo esperara. Esta es otra particularidad de la mecánica cuántica en comparación con la clásica.

En el mes de septiembre Born y Jordan enviaron una copia de su trabajo a Heisenberg, que ya estaba en Copenhague. Se lo mostró a Bohr diciéndole: «Está lleno de matrices y yo no tengo ni idea de lo que son». Pero tuvo que estudiar a marchas forzadas álgebra de matrices en libros especializados. Por correo, trabajó con Born y con Jordan para completar la formulación rigurosa de la nueva mecánica. El resultado fue un artículo enviado en noviembre de 1925 titulado «Sobre la mecánica cuántica II», firmado por Born, Heisenberg y Jordan, en orden alfabético. Se trata del famoso «Dreimännerarbeit» (trabajo de los tres hombres), que se convirtió en el tratado fundamental de la nueva teoría para quienes pudieran seguir los desarrollos matemáticos. Contenía los postulados básicos iniciales de la teoría cuántica presentados en la nueva formulación: existencia de estados estacionarios de energía en los átomos y saltos cuánticos entre estados acompañados de emisión o absorción de luz. Los autores se refieren a su teoría como «la verdadera teoría del discontinuo». En principio, permitía calcular cualquier sistema con movimientos periódicos, en estrecha analogía con la mecánica clásica. Todas las intrigantes propiedades de los átomos podían obtenerse ahora a partir de la nueva mecánica matricial. De hecho, Pauli y Dirac, separadamente, no tardaron en aplicarla al átomo de hidrógeno.

Pero esta mecánica matricial no fue bien acogida por muchos físicos, lo que no ha de extrañar mucho visto que la mayoría ignoraba qué era una matriz. Por ejemplo, Einstein escribió a su amigo Besso:

> El resultado teórico reciente más interesante es la teoría de los estados cuánticos de Heisenberg, Born y Jordan. Una verdadera tabla mágica de multiplicar, donde matrices infinitas reemplazan las coordenadas cartesianas. Es ingeniosa en extremo y, gracias a su enorme complejidad, está lo suficientemente protegida contra refutaciones.

El carácter abstracto de la teoría llevó a la mayoría a aceptar con alivio la más accesible mecánica ondulatoria, elaborada pocos meses después por Schrödinger.

LAS OTRAS FORMULACIONES DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

Recordemos que De Broglie había sugerido en 1923 que el electrón, al igual que el fotón, manifiesta una dualidad onda-partícula. Además, había observado que la óptica podría proporcionar una posible manera de compaginar esa dualidad. Cuando se describen los fenómenos de interferencia y difracción de la luz es necesario utilizar las ecuaciones de ondas, y se habla de *óptica física*. Pero, para describir la propagación de la luz a través de distintos medios basta considerar las trayectorias rectilíneas, como si se tratara de la propagación de partículas, con distintas velocidades según el medio que atraviesen. Esta es la llamada *óptica geométrica*. Un resultado conocido desde el siglo XIX era establecer las condiciones para obtener el límite geométrico de la óptica física, y usar rayos de luz en lugar de ondas. De alguna manera, sugirió De Broglie, en ese formalismo matemático de la física clásica se podría encontrar una analogía con la dualidad cuántica. El austriaco Erwin Schrödinger decidió considerar esta analogía de forma rigurosa para objetos cuánticos como el electrón. A lo largo de 1926, publicó en solitario seis artículos, en los que sentó las bases de otra formulación de la mecánica cuántica, conocida como mecánica ondulatoria. El párrafo inicial del primero de esos artículos ya anunció buenas noticias:

> En esta comunicación quisiera mostrar en primer lugar, con el ejemplo más sencillo posible de un átomo de hidrógeno (sin relatividad ni perturbaciones), que las reglas habituales de cuantificación pueden ser reemplazadas por otra condición en la que ya no hay que introducir «números enteros». Estos números enteros aparecen de la misma manera natural como el número entero de nodos de una

cuerda vibrante. Esta nueva concepción es susceptible de extensas generalizaciones y creo que toca de muy cerca la verdadera esencia de las condiciones de los cuantos.

LA ECUACIÓN DE SCHRÖDINGER

En la formulación desarrollada en 1925 por el físico austriaco Erwin Schrödinger, de gran importancia en la teoría de la mecánica cuántica, el estado de un sistema de partículas en interacción se describe completamente por su función de ondas Ψ, que depende del tiempo y de todas las coordenadas de las partículas. Si se ignoran los efectos relativistas, la función de ondas es solución de la ecuación

$$i\hbar\dot{\Psi}=H\Psi.$$

Analicemos a continuación la notación utilizada. El símbolo i corresponde a la unidad de los números imaginarios, es decir, $\sqrt{-1}$. El símbolo $\hbar$ es la constante reducida de Planck $h/(2\pi)$. El punto sobre una función es la manera abreviada de indicar una derivada respecto al tiempo. A la derecha de esta ecuación aparece la función hamiltoniana $H=T+V$, que es la suma de las energías cinética y potencial del sistema. En el caso particular de un electrón en el átomo de hidrógeno, la energía cinética, que en la física clásica corresponde a $T=p^2/(2m)$ corresponde ahora al operador

$$T=-\frac{\hbar^2}{2m}\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}+\frac{\partial^2}{\partial z^2}\right),$$

que indica las variaciones segundas respecto de las coordenadas espaciales (x, y, z) cuando actúa sobre la función de ondas. La energía potencial viene dada por la expresión de Coulomb, que en unidades convenientes se escribe como $V=-e^2/r$. Schrödinger se sorprendió mucho de la presencia del número i, porque estaba convencido de la «realidad» de la función de ondas. En uno de sus artículos escribió a pie de página un comentario en el que alude al humor escatológico de Pauli:

> Pero, ¿cómo ha podido introducirse $\sqrt{-1}$ en esta ecuación? Una respuesta, de la que no me atrevo a indicar aquí el sentido general, fue dada por un físico que dejó Austria hace algún tiempo, pero que [...] no ha perdido completamente su afilado humor vienés y que además es muy conocido por encontrar siempre la palabra justa. Esta fue su respuesta: el $\sqrt{-1}$ se ha deslizado en la ecuación (4") como algo que dejamos escapar por casualidad, experimentando no obstante un alivio inapreciable después de haberlo producido involuntariamente.

En términos matemáticos, el electrón en un átomo se caracteriza por una función de onda que se representa por la letra griega Ψ (se pronuncia «psi»), que es solución de una ecuación diferencial en derivadas parciales —un lenguaje familiar para todos los físicos— conocida como ecuación de Schrödinger.

«¿Es posible que la naturaleza sea tan absurda como nos parece en estos experimentos de física atómica?»

— Pregunta que a menudo se hacía Heisenberg, después de discutir con Bohr sobre la mecánica cuántica.

Einstein, como muchos otros físicos, quedó entusiasmado, y escribió a Schrödinger: «Estoy convencido de que usted ha hecho un avance decisivo con su formulación de la condición cuántica, al igual que estoy convencido de que el método de Heisenberg-Born es erróneo». Pero Einstein no tenía razón en esto último. El mismo Schrödinger demostró que la mecánica matricial y la mecánica ondulatoria son absolutamente equivalentes desde un punto de vista matemático, a pesar de diferir en los puntos de partida, las ideas y los métodos. En la mecánica matricial, «la verdadera teoría del discontinuo» según sus propios autores, el electrón se considera como una partícula. Las variables continuas clásicas se reemplazan por matrices que dependen de dos índices enteros, y las ecuaciones clásicas son reemplazadas por ecuaciones algebraicas. Por el contrario, la mecánica ondulatoria es una teoría del continuo, que considera al electrón como una onda. La ecuación dinámica es una ecuación en derivadas parciales, que contiene las misteriosas condiciones cuánticas de la vieja «teoría clásica de los cuantos». Sin embargo, ambas versiones conducen a los mismos resultados y, como subrayó Schrödinger, la superioridad de una versión sobre la otra solo tiene que ver con «la cuestión esencialmente secundaria de la comodidad de los cálculos».

Esta equivalencia entre mecánica matricial y mecánica ondulatoria fue demostrada, de manera independiente, por otros dos físicos: Pauli se limitó a comunicarla a Jordan por carta; el esta-

dounidense Carl Eckart se tomó el trabajo de publicar su demostración en una revista científica. Cabe hacer notar que esta no es una situación infrecuente en la historia de la ciencia: cuando diversos científicos están trabajando en el mismo problema pueden encontrar la solución de forma independiente, e incluso, una vez conocida la idea básica de una nueva teoría, llegar a formularla de manera completamente diferente. En efecto, esto dio origen a otras formulaciones de la mecánica cuántica. Por ejemplo, las extrañas reglas de multiplicación encontradas por Heisenberg, en las que el resultado depende del orden de los factores, llamaron la atención del inglés Dirac, estudiante de doctorado en Cambridge, quien en seguida apreció una analogía con los corchetes de Poisson, que es una de las diversas maneras de escribir las ecuaciones clásicas de movimiento. Y a partir de esa analogía elaboró su propia versión de la mecánica cuántica. Born recibió copia del manuscrito de Dirac poco después de haber completado con Heisenberg y Jordan su formulación matricial rigurosa de la mecánica cuántica. «Esta fue, lo recuerdo muy bien, una de las mayores sorpresas de mi vida científica.» Y no era para menos: muchos de los resultados obtenidos en Gotinga habían sido deducidos por Dirac de manera completamente distinta. Poco después, en 1926, Dirac y Jordan elaboraron, también de manera independiente, un formalismo más general en el que los estados y los observables cuánticos se describen en términos de vectores y operadores, respectivamente, en una estructura matemática llamada *espacio de Hilbert*. Las formulaciones matricial y ondulatoria aparecen como representaciones particulares de este esquema conceptual abstracto. Años más tarde, en 1942, Feynman presentó en su tesis doctoral otra formulación más de la mecánica cuántica, en la que se consideran a la vez todos los posibles caminos que puede seguir una partícula para ir de un punto a otro. Resulta muy llamativo que a menudo las leyes fundamentales de la física se puedan formular de distintas maneras muy diferentes a primera vista, pero que son completamente equivalentes. Feynman veía en este hecho un reflejo de que las leyes de la naturaleza son en realidad más simples de lo que nos parecen, y por eso se pueden describir de formas tan diversas en apariencia.

LAS PROBABILIDADES CUÁNTICAS

Schrödinger creía que con su mecánica ondulatoria había resuelto el problema de los saltos cuánticos. Para él, la función de ondas del electrón en el átomo de hidrógeno contendría una superposición de ondas con frecuencias muy próximas, que en lenguaje técnico se conoce como *paquete de ondas*. El volumen asociado a este paquete correspondería de algún modo al tamaño del electrón. Estaba convencido de que una transición cuántica no sería más que un simple intercambio de energía entre dos formas de vibración distintas, algo más intuitivo que la imagen de un electrón dando saltos de un nivel a otro. Pero esta interpretación es inconsistente, pues el paquete de ondas se ensancha en su evolución temporal, y acabaríamos por tener un electrón que ocuparía todo el espacio. Las formulaciones matricial y ondulatoria son equivalentes, pero las interpretaciones de sus autores eran incompatibles; al principio, Heisenberg fue bastante hostil a la teoría ondulatoria.

Su oposición no estaba siempre motivada por argumentos físicos, y es inevitable pensar en una cuestión de rivalidad, en una defensa de su propia «criatura». En julio de 1926, Sommerfeld invitó a Schrödinger a que presentara en Múnich sus resultados. Heisenberg, que había ido a visitar a sus padres, acudió a la charla e intervino para expresar varias críticas y subrayar aquellas cosas que, en su opinión, no podía resolver la mecánica ondulatoria, aunque tampoco lo hubiera hecho la mecánica matricial. Wien, quien estaba también en la audiencia, se enfureció por esta intervención. Le dijo cosas como que todo el mundo comprendía cómo se sentía al ver que su incomprensible mecánica matricial quedaba obsoleta, que aún le quedaba mucha física por aprender y que sería mejor que se sentara y se callara. Está claro que Wien no había modificado su mala opinión sobre Heisenberg desde el episodio de la tesis doctoral.

Born tenía otra actitud. A pesar de ser uno de los fundadores de la mecánica matricial, en seguida se dio cuenta de que el formalismo de Schrödinger se adaptaba mucho mejor para describir la evolución de una partícula dirigida sobre un blanco. Sin embargo, criticaba las imágenes físicas de Schrödinger porque en su





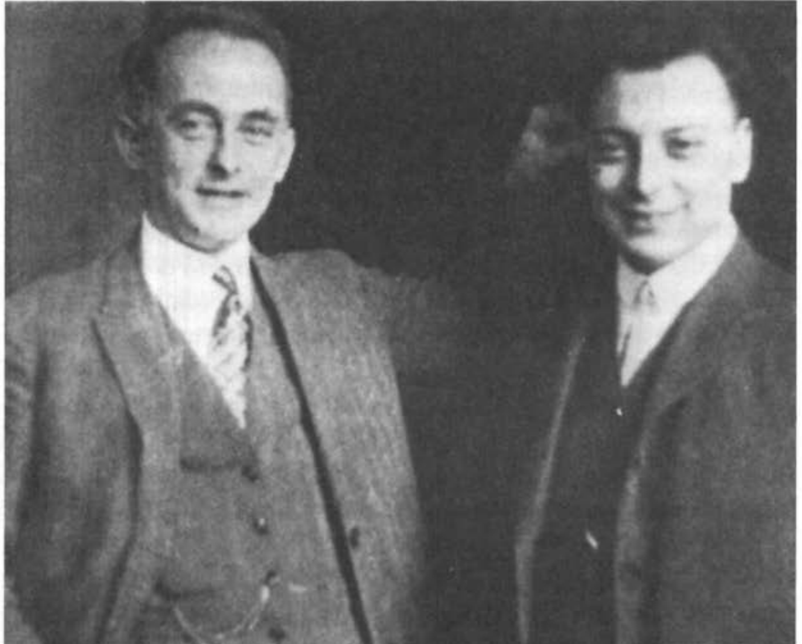


FOTO SUPERIOR IZQUIERDA:
Heisenberg en una conferencia en 1924.

FOTO SUPERIOR DERECHA:
Monolito en la isla alemana de Helgoland, con la leyenda: «En junio de 1925, Werner Heisenberg, a los veintitrés años, consiguió aquí el gran avance en la formulación de la mecánica cuántica, la teoría básica de las leyes de la naturaleza a escala atómica, lo que ha influido en el pensamiento humano más allá de la física». (Foto: Timo Kamph.)

FOTO INFERIOR:
Born, izquierda, junto a Pauli.

opinión intentaban volver a una teoría continua clásica. De manera práctica, proponía «retener solo el formalismo y dotarlo de nuevos contenidos físicos». En junio de 1926 publicó un trabajo sobre colisiones entre partículas cuánticas, en el cual apareció por primera vez la idea de probabilidad cuántica. Born argumentó que en los procesos de colisión hay que abandonar una visión determinista y referirse solo a la probabilidad de que, por ejemplo, la partícula incidente sea desviada en una dirección dada.

«Cuanto más reflexiono sobre la parte física de la teoría de Schrödinger, más horrible la encuentro.»

— Heisenberg en una carta a Pauli, en referencia a los intentos de Schrödinger de volver a una interpretación clásica de la teoría ondulatoria.

Esta probabilidad está contenida en la función de ondas $\Psi(x)$ que describe la dinámica de la partícula. De manera precisa, la probabilidad de localizar a la partícula en un pequeño volumen ΔV en torno a la posición x viene dada por el producto $|\Psi(x)|^2 \Delta V$. Por eso, en el transcurso del tiempo un electrón no ocupa todo el espacio —absurdo al que llevaba la interpretación de Schrödinger—, sino que aumenta la probabilidad de encontrarlo en cualquier punto del espacio, hasta llegar al valor unidad. La aparición de probabilidades representó un nuevo punto de partida en las discusiones en torno a la interpretación de la mecánica cuántica. Para los físicos de Gotinga y Copenhague la teoría cuántica era esencialmente indeterminista y, por tanto, su naturaleza probabilista era algo fundamental.

EL ESPÍN DEL ELECTRÓN

La descripción de los fenómenos atómicos se completó tras el descubrimiento del espín de los electrones. De repente se aclaró la necesidad de los números semienteros. La cosa empezó cuando, en 1924, Pauli se puso a pensar en el modelo «rumpf». Recorde-

mos que este consiste en considerar en el átomo dos partes: por una lado el «tronco» formado por el núcleo atómico y los electrones internos, y por otro, los electrones externos, los que están menos ligados. La explicación que dio Heisenberg al efecto Zeeman anómalo pasaba por dividir entre ambas partes un momento angular vagamente relacionado con el campo magnético de los electrones externos. A Pauli no le gustaba la idea de repartir un momento angular y sugirió que un electrón se caracteriza por cuatro números cuánticos, los tres ya conocidos por el modelo de Sommerfeld, más uno nuevo que solo podría tomar dos valores. Pauli enunció el principio que hoy lleva su nombre: en un átomo no puede haber dos electrones que tengan los mismos números cuánticos. De esta manera dio un sentido a la explicación que daba Bohr sobre el sistema periódico, en el que relacionaba un número de electrones a cada nivel de energía.

Estos resultados de Pauli llevaron a los holandeses S. Goudsmith y G. Uhlenbeck a introducir el espín del electrón. Siguiendo la analogía planetaria, un electrón podría efectuar una rotación sobre sí mismo y esta rotación había de estar cuantificada. Vieron además que para explicar los dobletes alcalinos, era necesario que el número cuántico correspondiente tomara solo los valores $+1/2$ y $-1/2$, en unidades de la constante reducida de Planck $\hbar$. Así se compaginaban los números semienteros, el modelo «rumpf», el principio de exclusión de Pauli y las observaciones experimentales. Además, como demostraron Heisenberg y Jordan, al incluir el espín del electrón en la mecánica cuántica se resolvía sin ambigüedades el efecto Zeeman, que tantos quebraderos de cabeza había dado.

Pero la imagen de un electrón girando sobre sí mismo es problemática. Si el electrón es puntual, ¿qué significa que un punto gire sobre sí mismo? Y si tiene un cierto tamaño, un punto del ecuador del electrón tendría una velocidad superior a la de la luz. Además, habría que conjeturar la estructura del electrón, que explotaría debido a la repulsión entre sus partes. Establecer sin más una analogía con la descripción clásica, insistir en analogías clásicas, puede traer este tipo de problemas. Más vale ser pragmático y admitir que el espín es una propiedad más del electrón, como lo son su masa, su carga eléctrica o su momento magnético.

Heisenberg pudo aclarar una propiedad intrigante del átomo de helio. El análisis de su espectro mostró que existían dos series distintas de términos espectrales, que no se mezclaban entre sí. Se pensó que tal vez existían dos helios diferentes, a los que se dieron los nombres de *parahelio* y *ortohelio*. La explicación de Heisenberg pasa por dos etapas que vamos a resumir ahora. Para empezar, se dio cuenta de que los electrones son indistinguibles entre sí: no podemos poner a cada uno una marca o un color que nos permita distinguirlos en su movimiento. En consecuencia, la función de ondas de un conjunto de electrones idénticos ha de tener algunas propiedades de simetría que reflejen esta propiedad. Hei-

LOS RIESGOS DE LAS ANALOGÍAS CLÁSICAS

Las analogías clásicas son útiles para entender la física cuántica, pero sucede a menudo que si se toman al pie de la letra, hasta las últimas conclusiones, se llega a contradicciones. Un ejemplo es la analogía que asocia el espín del electrón con un movimiento de rotación sobre sí mismo. Consideremos una esfera de radio R y masa M que gira sobre sí misma con una velocidad angular ω (es decir, número de rotaciones que realiza por unidad de tiempo). Un punto sobre el ecuador de la esfera tiene una velocidad dada por el producto de la velocidad angular y el radio: $V=\omega\cdot R$. El momento angular asociado a este giro (que es un vector cuya dirección coincide con la del eje de rotación), se puede escribir como el producto del momento de inercia de la esfera

$$I=\frac{2}{5}MR^2$$

por la velocidad angular: $L=I\cdot\omega$. Podemos así relacionar la velocidad que adquiere un punto ecuatorial con el momento angular del giro:

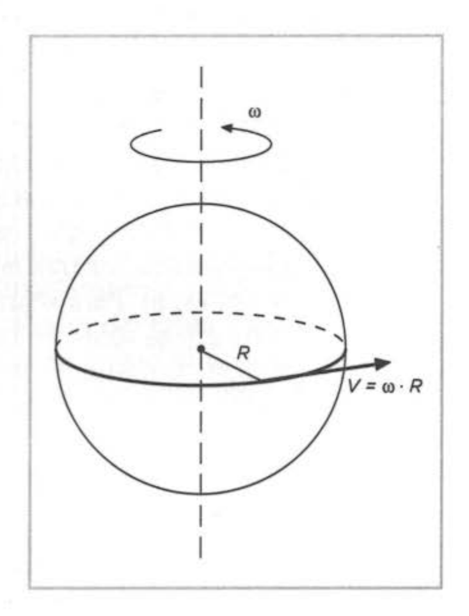
$$V=R\frac{L}{I}=\frac{5L}{2MR}.$$

Veamos ahora el valor de esta velocidad si reemplazamos en la fórmula anterior los datos asociados al electrón. Si relacionamos el momento angular con el espín del electrón pondremos $L=\hbar/2$. En unidades del sistema

senberg encontró que la función de ondas ha de ser antisimétrica (es decir, ha de cambiar de signo) cuando se intercambian dos electrones idénticos, ya que esta es la única posibilidad compatible con el principio de exclusión de Pauli. Vamos a precisarlo en un caso muy sencillo de un sistema con dos electrones.

Supongamos que los electrones pueden estar en dos estados cuánticos, que indicaremos con las letras a y b. La función de ondas se podrá escribir como $a(1)\,b(2)$, es decir: el electrón 1 en el estado a y el electrón 2 en el estado b. Pero como los electrones son idénticos, la distinción entre 1 y 2 es arbitraria; también podíamos haber escrito que la función de ondas es $a(2)\,b(1)$. La des-

internacional (metros, kilogramos y segundos), $\hbar = 10^{-34}$ y $M = 9 \cdot 10^{-31}$. ¿Qué valor podemos suponer para el radio R? Ciertamente, ha de ser menor que el tamaño de un átomo, y una estimación razonable es suponer que sea menor que un femtómetro (10^{-15} m), que es la unidad de longitud típica de un núcleo atómico. Sustituyendo estos números en la anterior expresión obtenemos para la velocidad de un punto ecuatorial un valor más de 500 veces superior a la velocidad de la luz en el vacío, cifra que será aún mayor si se toma un valor más pequeño para el radio. Es decir, si se asocia el espín del electrón a una rotación sobre sí mismo se llega a un resultado en contradicción con la teoría de la relatividad, pues ningún objeto puede moverse con una velocidad superior a la de la luz en el vacío. Así, los resultados de la mecánica cuántica no siempre tienen una interpretación sencilla en términos intuitivos basados en analogías clásicas.



cripción más general de la función de ondas será una combinación lineal de ambas posibilidades, tal como se expresa en las dos combinaciones siguientes:

$$a(1)\,b(2) + a(2)\,b(1)$$

y

$$a(1)\,b(2) - a(2)\,b(1),$$

que solo difieren en un signo. Si se intercambian los índices 1 y 2 o los estados a y b, se obtiene la misma combinación en el primer caso y un cambio de signo en el segundo. Se dice que estas combinaciones son simétrica y antisimétrica, respectivamente, al intercambiar índices de partículas o de estados. ¿Cuál de estas dos combinaciones cumple el principio de exclusión? Si ponemos los dos electrones en el mismo estado, la combinación antisimétrica da como resultado cero, contrariamente a la simétrica. Parece que la combinación antisimétrica es una manera apropiada de tener en cuenta el principio de Pauli. Este ejemplo sencillo ilustra un resultado más general, válido para un sistema formado por muchos electrones: su función de ondas ha de ser antisimétrica —es decir, ha de cambiar de signo— cuando se intercambian los índices de dos electrones cualesquiera.

Volvamos al átomo de helio, y vamos a precisar la notación genérica anterior. La función de onda de cada electrón es el producto de una parte espacial, caracterizada por unas etiquetas n o m para representar los tres números cuánticos, y una parte que depende del espín. Para representar la parte espacial utilizaremos la letra griega «phi», en las notaciones $\varphi_n(1)$ o $\varphi_m(2)$. Para la parte de espín, la costumbre es representar los dos posibles estados de espín por las letras griegas alfa y beta, así que escribiremos $\alpha(1)$ y $\beta(1)$.

La función de ondas para los dos electrones se escribe como

$$\varphi_m(1)\,\varphi_n(2)\,\alpha(1)\,\beta(2) - \varphi_m(2)\,\varphi_n(1)\,\alpha(2)\,\beta(1).$$

Se trata de una combinación efectivamente antisimétrica: vemos que al intercambiar las etiquetas de cada electrón se ob-

tiene el mismo resultado, pero cambiado de signo. También vemos que si las etiquetas de los estados son iguales, el resultado es cero. Se cumple, pues, el principio de Pauli.

Pero la siguiente combinación también satisface este requerimiento:

$$[\varphi_m(1)\,\varphi_n(2) + \varphi_m(2)\,\varphi_n(1)] \cdot [\alpha(1)\,\beta(2) - \alpha(2)\,\beta(1)].$$

Es un producto de una combinación simétrica de partes espaciales por una combinación antisimétrica de partes de espín. Lo mismo sucede con la siguiente combinación:

$$[\varphi_m(1)\,\varphi_n(2) - \varphi_m(2)\,\varphi_n(1)] \cdot [\alpha(1)\,\beta(2) + \alpha(2)\,\beta(1)],$$

en la que se han invertido las simetrías: una combinación antisimétrica de partes espaciales por una combinación simétrica de partes de espín. De hecho, puede comprobarse que la suma de estas dos nuevas combinaciones es igual, salvo un factor global, a la primera función de ondas que hemos escrito para los dos electrones. Pero esta manera diferente de escribir las cosas aporta más información física. Heisenberg demostró que estas nuevas combinaciones describen dos conjuntos distintos de estados del átomo de helio, precisamente las series del parahelio y del ortohelio. En el primer caso, la parte de espín es antisimétrica y se obtiene lo que en espectroscopia se llama un *singlete*, es decir, un único estado de espín total. En el caso del ortohelio, cuya parte de espín es simétrica, se obtiene un *triplete*, es decir, tres posibles estados con el mismo valor del espín total. Por lo tanto, el misterio de los dos helios se aclara al considerar el espín del electrón: se trata de dos posibles combinaciones de estos espines.

Heisenberg aplicó estas mismas ideas al caso de la molécula de hidrógeno, que tiene dos protones y dos electrones, lo que le llevó a predecir la existencia de dos formas del hidrógeno, llamadas también «para» y «orto», que fueron descubiertas en 1929. Se trata de dos estados de la molécula, con distinto valor de su espín total, que coexisten a temperatura ambiente en proporción de 1/4

de «para» y 3/4 de «orto». Esto fue mencionado también en la concesión del premio Nobel: la aplicación de la mecánica cuántica condujo «al descubrimiento de las formas alotrópicas del hidrógeno».

LA INCERTIDUMBRE CUÁNTICA

En mayo de 1926, Heisenberg volvió a Copenhague, esta vez como ayudante de Bohr por un año. Ya tenía suficientes conocimientos de danés para dar cursos a estudiantes. Bohr estaba entusiasmado con su visita, y en una carta a Rutherford le escribió: «Heisenberg está ahora aquí y todos estamos muy ocupados con discusiones sobre la nueva evolución de la mecánica cuántica y sobre las inmensas perspectivas que contiene».

Heisenberg fue invitado por el embajador alemán en Copenhague a una velada musical en su residencia. Uno de sus hijos adolescentes, Carl von Weizsäcker, estaba interesado por la física y había pedido a su padre que invitara a tan distinguido físico. Sin duda, el continuo trato que Heisenberg tenía con sus jóvenes exploradores facilitó que entre ellos se estableciera una mutua simpatía, a pesar de que el joven Weizsäcker fuera diez años menor y aún cursara estudios secundarios. Años después, Weizsäcker hizo el doctorado con Heisenberg y se convirtió en uno de sus pocos amigos íntimos. Más adelante se volverá a hacer mención a él en esta historia.

Bohr invitó a Schrödinger para discutir acerca de la interpretación de la mecánica cuántica. Según Heisenberg, las discusiones entre Bohr y Schrödinger empezaron ya en la estación de tren de Copenhague, y cada día duraban desde el desayuno hasta bien entrada la noche. Schrödinger estaba alojado en casa de Bohr, así que no tenía escapatoria. Incluso cuando tuvo que guardar cama por un resfriado, Bohr seguía con las discusiones, sentado a la cabecera de la cama. En los años sucesivos, Bohr recordaba a menudo la importancia que tuvieron esas discusiones para la evolución de su pensamiento. Tras la partida del exhausto Schrödinger, y durante los meses siguientes, la interpretación de la mecánica cuán-

tica fue el tema central de todas las conversaciones entre Bohr y Heisenberg. Sus discusiones se centraban sobre todo en la aún no asimilada dualidad partícula-onda.

Ya se ha visto que el punto de partida de la mecánica matricial fue la imagen del electrón como una partícula, mientras que el de la mecánica ondulatoria era la imagen del electrón como una onda. Ambos esquemas eran consistentes y equivalentes desde un punto de vista matemático, pero eso no aclaraba nada sobre si el electrón era una onda o una partícula. Heisenberg tendía más a aferrarse a la mecánica matricial y siempre esperaba encontrar algún fallo en la ondulatoria, pero Bohr aceptó siempre que había dos descripciones equivalentes. Aceptaba la existencia simultánea de los dos conceptos y pensaba que, aunque sean excluyentes, ambos son necesarios para una descripción completa de los fenómenos atómicos. Las discusiones entre Bohr y Heisenberg no llevaron más que al agotamiento de los dos interlocutores, y a finales de febrero, Bohr se fue de vacaciones a Noruega. Poco después, Heisenberg encontró sus famosas desigualdades.

En marzo de 1927, Heisenberg escribió en Copenhague otro artículo fundamental, «Sobre el contenido físico de la teoría cuántica de la cinemática y la mecánica», que contiene lo que se conoce como relaciones de indeterminación, aunque más tarde se apuntará alguna cosa más sobre el vocabulario. La idea motriz está escrita al principio del artículo:

> Si se quiere dejar claro el significado de las palabras «posición de un objeto», por ejemplo de un electrón (en un determinado sistema de referencia), hay que especificar los experimentos concretos con los que se intenta medir la «posición del electrón»; de cualquier otro modo, estas palabras no tienen sentido.

Dice Heisenberg que el contenido de una teoría física no está en las ecuaciones matemáticas, sino en los nuevos conceptos y en su significado. Hasta principios del siglo XX, la mecánica clásica de Newton era el fundamento de la física. La teoría de la relatividad cambió las nociones de espacio, tiempo y masa, y mostró el límite de estos conceptos cuando las velocidades son comparables a las

de la velocidad de la luz. Según Heisenberg, un cambio similar aparece cuando se consideran masas pequeñas moviéndose en distancias muy pequeñas, como en el movimiento de los electrones en el átomo. El problema es que no se puede observar este movimiento,

INCERTIDUMBRE CON ONDAS CLÁSICAS

En la figura 1 se ha representado la variación espacial de una onda de la forma $\cos(2\pi k_0(x-x_0))$, cuyo número de ondas toma el valor preciso k_0. Su indeterminación es por tanto $\Delta k = 0$. La onda está definida en todo el espacio, y por lo tanto podemos decir que tiene una indeterminación espacial infinita $\Delta x = \infty$. En la figura intermedia se ha representado una superposición de cinco ondas, con números de onda k muy próximos a k_0. Estas ondas se han dibujado en gris, y la onda resultante en negro. Debido a las interferencias, el aspecto es muy diferente al de la figura superior: hay puntos en los que las ondas interfieren constructivamente, y se refuerzan, mientras que hay otros puntos en los que lo hacen destructivamente, y tienden a oponerse entre sí. Hagamos ahora una superposición de un número infinito de ondas, cada una con un peso dado por una función gaussiana

$$e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{k-k_0}{\Delta k}\right)^2},$$

es decir, con números de onda en torno al valor k_0, con una «anchura» Δk. Esta gaussiana se ha representado en la figura 2. La función toma su valor máximo cuando el número de ondas coincide con el valor central. Hemos caracterizado la anchura de la función cuando esta toma el valor $e^{-1/2}$, aproximadamente 0,61. A efectos prácticos, más allá de tres veces la anchura, en uno u otro sentido del valor central, se puede despreciar el valor de esta función. Como resultado de la superposición, se tiene una onda como la última de la figura 1, con número de onda k_0, pero modulada por una función

$$e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-x_0}{1/\Delta k}\right)^2}.$$

Se le llama «paquete de ondas gaussiano», que como vemos ya no se extiende en toda la región del espacio, sino en torno a un punto x_0 con una anchura $\Delta x = 1 / \Delta k$. Es decir, las anchuras de los números de onda y de las dimensiones espaciales están relacionadas entre sí: $\Delta k \cdot \Delta x = 1$. Esto es la relación de Heisenberg con ondas clásicas.

sino solo el comportamiento global de un gran número de átomos, manifestado por ejemplo a través de las frecuencias de la luz emitida o absorbida por los estos. Para explicar estas propiedades ha sido necesaria una nueva mecánica, que introduce la aparición de

Demos un paso más, recordando que el momento de una partícula se define a partir del número de ondas asociado: $p = \hbar k$; la presencia de la constante reducida de Planck indica que este es un resultado cuántico. Se llega a la relación $\Delta p \cdot \Delta x = \hbar$, que es compatible con la desigualdad de Heisenberg.

FIG. 1

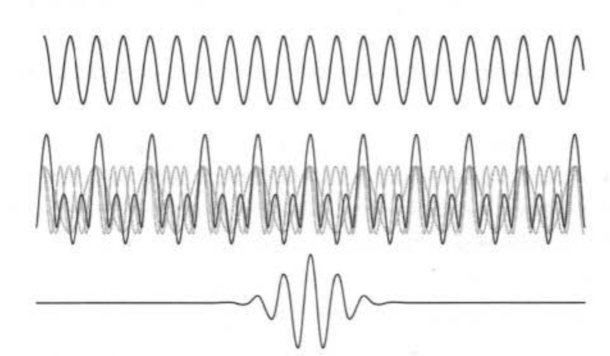
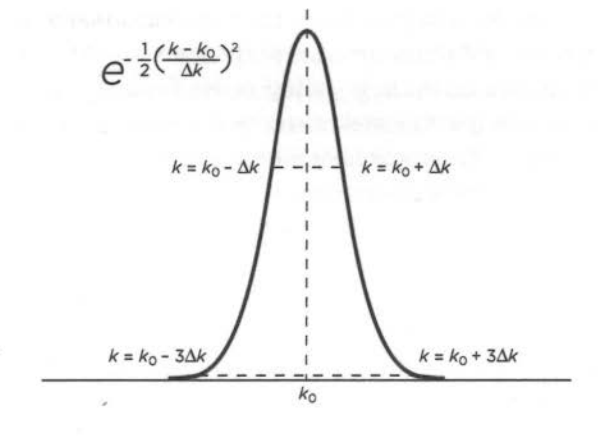


FIG. 2



discontinuidades, manifestadas en la presencia de cuantos discretos, o paquetes, de energía, y en saltos cuánticos entre distintos estados de energía. Debido a su pequeñez, las discontinuidades no son observables a escala macroscópica, que nos parece un mundo continuo. Según el propio Heisenberg:

> Cuando se admite que las discontinuidades son de alguna manera típicas de los procesos que ocurren en regiones pequeñas y en intervalos de tiempo pequeños, entonces es muy plausible una contradicción entre los conceptos de «posición» y de «velocidad». La imagen clásica de la trayectoria de una partícula como una curva continua debe reemplazarse por una serie discreta de puntos en el espacio y en el tiempo. Esto hace que las ideas clásicas fallen cuando se trata de medir simultáneamente su posición y su momento.

Una partícula clásica se describe especificando los valores de su posición y su velocidad en todo instante. Pero estos conceptos solo tienen sentido en el caso de una partícula atómica si se hace referencia al procedimiento utilizado para medirlos. En otras palabras, un físico no conoce más que lo que puede medir, y aquí es donde el principio de incertidumbre cobra su significado.

Un poco de cálculo llevó a Heisenberg al siguiente resultado. Supongamos que, en un experimento dado, se determina una posición x con una precisión Δx, y que su momento asociado p se determina con una precisión Δp. Esto significa que como resultado de la medida la posición se encuentra, con cierta probabilidad, entre los valores $x-\Delta x$ y $x+\Delta x$ y análogamente para el momento. ¿Podemos hacer estas precisiones tan pequeñas como queramos? Heisenberg demostró que no, pues su producto es del orden de la constante de Planck, lo que se escribe: $\Delta x \cdot \Delta p \approx h$. Esta expresión refleja una limitación recíproca: cuanto menor sea un factor, mayor será el otro, cuanto más precisa sea la determinación de una de estas magnitudes, menor será la de la otra. De manera rigurosa se demuestra que esta relación es de hecho una desigualdad:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2.$$

El producto de las precisiones en la posición y el momento está acotado por la constante reducida de Planck $\hbar = h/(2\pi)$ dividida por 2.

Lo importante es que la única conclusión consistente con la mecánica cuántica es que la posición y el momento de un electrón no se pueden medir simultáneamente con precisión arbitraria: «Cuanto más precisamente determinamos la posición, más imprecisa es la determinación del momento en ese instante, y viceversa». Las relaciones recíprocas entre imprecisiones de estas dos medidas se aplican también a otros pares de magnitudes, como por ejemplo la energía y el tiempo o el momento angular y el ángulo. En la jerga técnica se dice que son magnitudes *canónicamente conjugadas*, lo que significa que su producto tiene unidades de acción —es decir, energía por tiempo—, como la constante de Planck. Recordemos uno de los resultados obtenidos por Born y Jordan: las matrices asociadas a estas magnitudes no conmutan. En efecto, es el ingrediente que permite demostrar la desigualdad anterior.

Bohr se mostró entusiasmado con el resultado de Heisenberg, porque en él veía una indeterminación inducida por la dualidad onda-partícula. Pero al leer el manuscrito con detalle encontró un error importante, que fue objeto de largas y ásperas discusiones entre ambos. El error no se refería ni al razonamiento ni a las conclusiones, sino a un ejemplo —el microscopio de rayos gamma— que Heisenberg había utilizado para explicar el resultado, basándose exclusivamente en la existencia de discontinuidades. Se siguió entre ellos una discusión de varios días, planteada en términos inusualmente muy duros. La cosa se complicaba porque el artículo ya estaba en prensa. Heisenberg manifestó: «Recuerdo que aquello se acabó cuando me eché a llorar, porque simplemente no podía soportar la presión de Bohr», pero tuvo que aceptar que Bohr tenía razón. En una nota añadida al final del artículo, el científico alemán mencionó que Bohr le había hecho ver que había ignorado algunos aspectos esenciales en la discusión de los resultados:

> Sobre todo, la incertidumbre en nuestra observación no resulta exclusivamente de la presencia de discontinuidades, sino que está directamente relacionada con el requerimiento de adscribir igual

validez a experimentos muy diferentes que surgen de la teoría corpuscular por un lado y de la teoría ondulatoria por otro.

Vamos a ver de cerca el ejemplo que imaginó Heisenberg para ilustrar las relaciones de indeterminación.

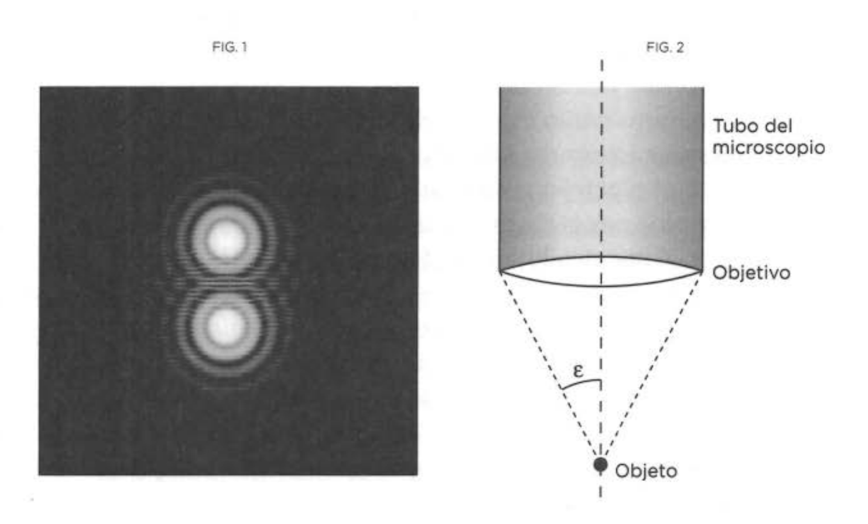
EL MICROSCOPIO DE HEISENBERG

Heisenberg imaginó un microscopio para medir la posición y la velocidad de un electrón que, en vez de funcionar con luz visible, lo hace con rayos gamma, es decir con luz de muy corta longitud de onda. Se trata de un experimento pensado, es decir, un experimento lógicamente posible, aunque por razones prácticas no pueda realizarse. No existen hoy en día materiales capaces de focalizar los rayos gamma, como hacen las lentes con la luz visible, y por eso se trata de un experimento pensado. Pero su funcionamiento responde a los mismos principios que el de un microscopio ordinario. Con luz visible no se pueden detectar objetos cuyo tamaño sea mucho más pequeño que su longitud de onda, que está comprendida entre unos 400 y 700 nm. Se pueden observar las bacterias, cuyo tamaño se mide en micras —es decir, 1 000 nm—, pero no se distinguen los virus, que tienen un tamaño cien veces menor.

El científico alemán había supuesto que la precisión en la determinación del electrón venía dada por la longitud de onda de los rayos gamma, $\Delta x \approx \lambda$, y que la precisión en su momento era igual a la del momento del fotón, dado por la relación de De Broglie, $\Delta p \approx h/\lambda$. De este modo se obtiene en seguida la relación $\Delta x \cdot \Delta p \approx h$. Pero Bohr le hizo ver que el análisis completo del experimento se basa en dos imágenes inconsistentes de la naturaleza de la luz. Lo curioso de esta historia es que, aparte de la interpretación relacionada con la dualidad onda-partícula, en aquel momento Heisenberg no recordaba nada sobre el poder de resolución de un microscopio, como ya le sucedió durante su examen para la tesis doctoral.

PODER DE RESOLUCIÓN DE UN MICROSCOPIO

Debido a las propiedades de difracción de las ondas luminosas, la imagen que se percibe de un punto observado a través de una lente, o de un conjunto de lentes, no es un punto, sino unos círculos más o menos difuminados (figura 1).



Si dos puntos están muy próximos, la superposición de los círculos de sus imágenes impedirá distinguir si hay un punto o dos. El poder de resolución de un microscopio es la mínima distancia entre dos puntos para que se distingan a través del sistema de lentes. Las leyes de la óptica permiten demostrar que esta distancia mínima se escribe como

$$1{,}22\frac{\lambda}{2n\ \mathrm{sen}\varepsilon},$$

donde el factor 1,22 está relacionado con el análisis del círculo borroso de la imagen. Como se muestra en la figura 2, los otros factores que intervienen son la longitud de onda λ de la luz, el índice de refracción n del medio entre el objeto y el objetivo, y el seno del ángulo ε (figura 2), que es igual a la mitad del ángulo subtendido por el objeto y la lente. Si el medio es aire, el índice de refracción es igual a la unidad, y el factor global vale 0,61. Para muchas discusiones cualitativas, se puede aproximar a uno.

El poder de resolución de un microscopio es la mínima distancia entre dos puntos para poder ser distinguidos a través del microscopio, y esto es lo que fija la imprecisión en la posición del electrón. La imagen de un punto a través de un microscopio consiste en unos círculos concéntricos de difracción, y la óptica ondulatoria muestra que la mínima distancia para resolver dos puntos viene dada por $\Delta x \approx \lambda/\text{sen}\,\varepsilon$, es decir, el cociente entre la longitud de onda y el seno del semiángulo ε de apertura del objetivo. En realidad, esta no es la expresión exacta, pues hay que multiplicar por un factor que depende de la geometría del dispositivo, pero como el valor de ese factor es próximo a la unidad, podemos ignorarlo aquí. Por otro lado, debido al choque con el fotón, el electrón recibe un momento en la dirección x, que se determina por el momento del fotón después del choque, tal como quedó demostrado en el efecto Compton. Pero la dirección del fotón no puede conocerse exactamente, pues está indeterminada dentro del cono de rayos que entran en el microscopio. Unas consideraciones cinemáticas y geométricas hacen ver que su valor es $\Delta p \approx h/\lambda\,\text{sen}\,\varepsilon$. Se obtiene por tanto el mismo resultado $\Delta x \cdot \Delta p \approx h$. Podríamos pensar que no vale la pena hacer un razonamiento más complicado para llegar a lo mismo. Tal vez esto pensara Heisenberg en su discusión con Bohr, pero la insistencia de este se debía a la importancia conceptual que tiene la dualidad onda-partícula. En este caso, esa dualidad se refleja en dos aspectos de un mismo experimento. El poder de resolución del microscopio hace intervenir el carácter ondulatorio de la luz, y su carácter corpuscular aparece en la determinación del momento del fotón.

ALGUNAS CONSECUENCIAS FILOSÓFICAS

Al final de su artículo, Heisenberg escribió un comentario sobre las importantes consecuencias de sus desigualdades. Recordemos que unos años antes Niels Bohr había llegado a sugerir, en un acto de desesperación, que tal vez ciertas leyes básicas de la física —como el principio de causalidad o la conservación del momento

y de la energía— podrían no ser estrictamente ciertas a escala atómica y cumplirse solo en promedio. Los experimentos mostraron que esta sugerencia no era cierta, pero ahora Heisenberg se dio cuenta de que el principio de causalidad se veía afectado por la mecánica cuántica.

Las ecuaciones de la física clásica determinan la evolución temporal de un sistema si se conocen las posiciones y los momentos de todos sus constituyentes en un mismo instante inicial. Esto fue expresado en 1814 por el francés Pierre-Simon Laplace a escala universal:

> Debemos considerar el estado presente del universo como el efecto de su estado anterior, y como la causa del que vendrá. Una inteligencia que conociera en un instante dado todas las fuerzas que actúan en la naturaleza y la situación respectiva de los entes que la componen, si además fuera tan vasta para analizar todos estos datos, englobaría en la misma fórmula los movimientos de los mayores cuerpos del universo y los del más pequeño átomo. Nada le sería incierto y tanto el futuro como el pasado estarían ante sus ojos.

Por aquel entonces, todo el mundo creía que la precisión de cualquier medida solo estaba limitada por la precisión de los instrumentos de medida utilizados. Pero Heisenberg demostró que eso no es así en el caso de ciertos pares de magnitudes —las llamadas canónicamente conjugadas— como la posición y el momento de una partícula. La mecánica cuántica establece un límite a la precisión con la que se pueden conocer estas magnitudes en el mismo instante, independientemente de la calidad de los instrumentos de medida utilizados. En consecuencia, Heisenberg escribió:

> [...] En la formulación de la ley de causalidad «Si conocemos el presente precisamente podemos predecir el futuro», lo que es falso no es la conclusión, sino la premisa. No podemos conocer el presente con todo detalle, ni siquiera en principio.

Hay muchas más consecuencias filosóficas suscitadas por este artículo. Si, como dice Heisenberg, los conceptos físicos no

tienen sentido más que en función de los experimentos que puedan efectuarse, ¿existe un mundo real independiente de ser observado? Por otro lado, el determinismo de la física clásica —la inteligencia de Laplace— parece que es incompatible con el libre albedrío. ¿Se abre una posibilidad de su existencia con las relaciones de Heisenberg? Estas y otras preguntas más han sido planteadas desde el primer momento por físicos y filósofos. Aquí nos hemos limitado a tratar dos de ellas, y remitimos a la bibliografía al lector interesado en estos temas.

EL ESPÍRITU DE COPENHAGUE

En 1929, Heisenberg publicó *Los principios físicos de la teoría cuántica*, que se convirtió inmediatamente en una referencia básica para estudiar mecánica cuántica. En el prólogo escribió que su objetivo era contribuir a difundir el «espíritu de Copenhague de la teoría cuántica», que ha dirigido todo el desarrollo de la moderna física atómica. La palabra «espíritu» —«Geist» en alemán— era de uso frecuente en la Alemania de aquellos años, y el espíritu de Copenhague era Bohr, evidentemente. A lo largo de su vida, Heisenberg dio muchas conferencias y publicó numerosos artículos sobre la mecánica cuántica, su interpretación y las cuestiones filosóficas que plantea. De hecho, la interpretación fue fundamentalmente obra de Bohr. En una ocasión, Heisenberg se refirió a la interpretación de Copenhague y este nombre se popularizó desde entonces. Vamos a resumirla ahora.

Bohr presentó la primera versión elaborada de esa interpretación en dos congresos, celebrados en Como, Italia, y en Bruselas, en los meses de septiembre y octubre de 1927, respectivamente. Aunque después hizo retoques y correcciones, pues Bohr nunca dio por acabadas estas cuestiones, los aspectos esenciales de su interpretación no han variado. Hay veces que se califica de interpretación «ortodoxa», lo que puede dar a entender que es una teoría dogmática. Sin embargo, eso es ignorar que el pasatiempo favorito de la mayoría de los físicos es la heterodoxia, al menos en cuestio-

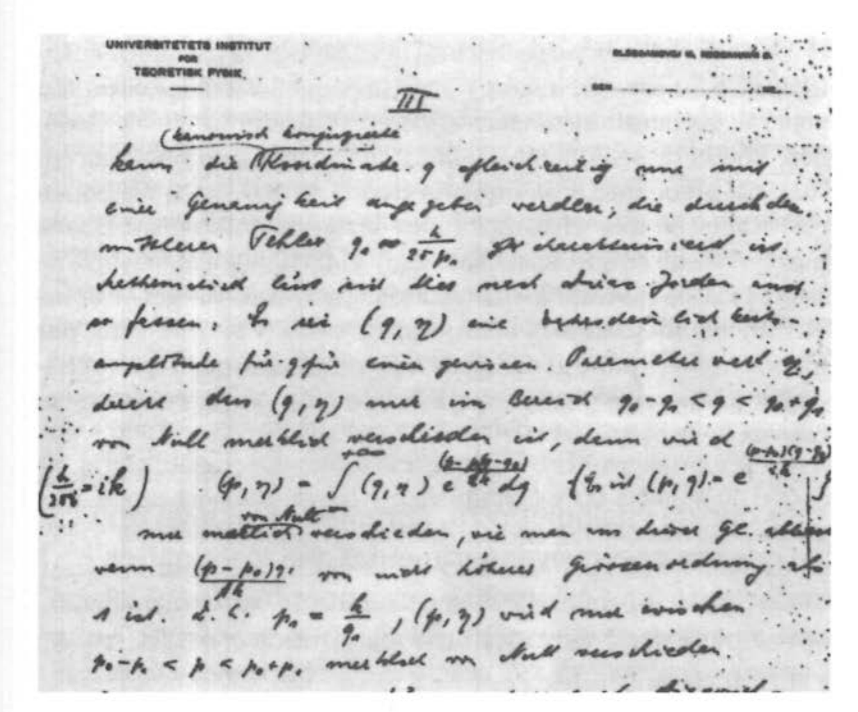
nes de física. Es cierto que hay algunas interpretaciones alternativas, pero hasta ahora no han podido ofrecer una versión coherente, sencilla y compatible con las observaciones experimentales. Tal vez tenga razón el británico-estadounidense A. J. Legget cuando sugiere el nombre de *no interpretación de Copenhague*, pues lo que viene a decir, básicamente, es que cualquier intento de interpretar la mecánica cuántica en términos intuitivos está condenada al fracaso. Los términos intuitivos están basados en la física clásica, que incluye conceptos como la continuidad de los fenómenos en el espacio y en el tiempo, la distinción entre onda y partícula, la causalidad y el determinismo, o la idea de que los objetos poseen propiedades independientes de la forma de medirlos. La física cuántica cambia esas ideas: hay magnitudes que varían de manera discontinua; un objeto cuántico parece ser onda y partícula a la vez; en vez de determinismo aparecen las probabilidades cuánticas; ciertos pares de magnitudes no pueden determinarse con precisión arbitraria; las medidas experimentales no pueden interpretarse como información sobre las propiedades independientes de los objetos; etcétera.

La interpretación de Copenhague se basa fundamentalmente en tres puntos: el principio de complementariedad, la interpretación probabilística de la función de ondas y las desigualdades de Heisenberg. Ya hemos hecho alguna referencia sobre los dos últimos, así que ahora nos ocuparemos del primero. Bohr venía a decir que la teoría clásica se verifica al contrastarla con observaciones y medidas que se efectúan mediante instrumentos como balanzas, termómetros, voltímetros, etc. Esta teoría encontró un límite de validez cuando se exploró la materia a escala atómica, y para describir los fenómenos a esa escala se hizo necesaria la mecánica cuántica. Bohr subrayó que si bien la mecánica cuántica ha cambiado la física clásica, su validez sigue siendo contrastada con los mismos instrumentos. Es decir, aunque los fenómenos cuánticos sean nuevos, las lecturas de los detectores se continúan haciendo en términos clásicos. Es importante resaltar esto: los instrumentos de medida deben seguir siendo descritos mediante las leyes de la física clásica porque, según Bohr, solamente esta proporciona «un lenguaje desprovisto de ambigüedad». Tan solo

al describir las observaciones en términos clásicos se pueden evitar las paradojas lógicas planteadas en apariencia por la dualidad onda-partícula. Estos dos conceptos, definidos en física clásica, se excluyen mutuamente, pero en física cuántica ambos son necesarios para obtener una comprensión total de las propiedades de un objeto, que se comportará como onda o como partícula según la elección del dispositivo experimental que permita observarlo. Son, por tanto, conceptos complementarios. Esta idea de complementariedad no se limita a los conceptos de onda y partícula, sino que se aplica a otros como, por ejemplo, la posición y la velocidad de un objeto cuántico, que solo están bien definidos dentro de los límites de la relación de indeterminación.

Einstein, entre otros físicos, no estaba dispuesto a aceptar esta conclusión a ninguna escala de aplicabilidad. Los debates entre Einstein y Bohr sobre estas cuestiones son famosos y han sido muy fructíferos. Einstein imaginaba experimentos —que, como ya hemos indicado, son lógicamente posibles, aunque no se puedan realizar por cuestiones técnicas—, pensados para demostrar que la interpretación de Bohr era inadecuada, pero Bohr siempre refutaba todos los argumentos de Einstein. El experimento pensado que ha traído más consecuencias es la llamada *paradoja EPR*, por el nombre de los tres autores, Einstein, Podolski y Rosen, quienes la publicaron en 1935. Imaginaban dos partículas creadas en el mismo punto, que salen en direcciones opuestas; por ejemplo, como resultado de la desintegración de otra partícula. Sus momentos son iguales y de sentido contrario. Si se mide la posición de una de las partículas y el momento de la otra cuando están tan alejadas que no ejercen ninguna interacción entre sí, es posible deducir simultáneamente ambas magnitudes para cada una de las partículas por separado. Por lo tanto, concluían los autores, no es cierto que no se puedan definir con precisión arbitraria al mismo tiempo, tal como afirma Bohr. Lo contrario es suponer que estas partículas se transmiten, en el momento de la medida, una información instantánea, lo que es incompatible con la teoría de la relatividad.

En su momento, algunos periódicos anunciaron en titulares que Einstein atacaba la teoría cuántica, pero eso no era entender


UNIVERSITETETS INSTITUT FOR TEORETISK FYSIK

BLEGDAMSVEJ 15, KØBENHAVN Ø.

III



Fragmento de la carta escrita por Heisenberg a Pauli el 23 de febrero de 1927, en la que ya se exponían las bases del principio de incertidumbre, que se incorporó en la interpretación de Copenhague. Heisenberg y Bohr (en la imagen inferior), junto con Max Born, fueron los principales protagonistas del llamado «espíritu de Copenhague».

el fondo del asunto: no se discutía la validez de la mecánica cuántica, sino su interpretación y sus consecuencias filosóficas. En general, las cuestiones relacionadas con la interpretación filosófica, a pesar de ser fundamentales desde un punto de vista conceptual, no preocupan a la mayoría de los físicos, pues no tienen relevancia en sus investigaciones y tareas cotidianas. Buena prueba de ello es que, hasta hace muy poco tiempo, la mayoría de los textos de mecánica cuántica las ignoraban. En general, los científicos adoptan una actitud pragmática y se interesan por cuestiones que puedan conducir a predicciones, que serán verificadas o falseadas por la experiencia o bien por la consistencia interna de la propia teoría.

«De Bohr, más que de cualquier otro, aprendí este nuevo tipo de física teórica que era casi más experimental que matemática [...] El asunto importante aquí es que hay que encontrar las palabras y los conceptos para describir una curiosa situación en física que es muy difícil de entender.»

— HEISENBERG, EN CONVERSACIONES CON EL HISTORIADOR T.S. KUHN, 1963.

El experimento pionero realizado en el año 1982 por A. Aspect, J. Dalibard y G. Roger cambió las cosas. Las predicciones más paradójicas de la mecánica cuántica están siendo verificadas desde entonces, haciendo decir a algunos que la metafísica se ha hecho experimental. Además, han dado paso al desarrollo de la información cuántica, un campo de investigación cuyo origen puede remontarse a la paradoja EPR.

DISQUISICIONES SOBRE VOCABULARIO

¿Principio, relaciones, desigualdades? ¿Incertidumbre, incerteza, imprecisión, indeterminación? Las posibles combinaciones de estas palabras se usan para referirse a un mismo resultado, lo que

se presta a confusiones que conviene aclarar. Vaya por delante que todas estas confusiones se evitan con la expresión más neutra de relaciones o desigualdades de Heisenberg.

En física se suele usar la palabra *principio* para indicar una hipótesis fundamental, en general justificada mediante experimentos, a partir de la cual se emprende el estudio de un campo específico. Son ejemplos el principio de Arquímedes, el principio de Pascal o los principios de la termodinámica. El contenido de los dos primeros ya fue demostrado hace tiempo, pero, por costumbre o por homenaje a sus autores, se sigue usando la palabra principio. Heisenberg no la utilizó porque no postuló sus resultados sino que los dedujo, así que en realidad habría que decir *teorema* o, por lo menos, *relación* o *desigualdad* de Heisenberg. Sin embargo, pocos meses después de que apareciera el artículo de Heisenberg, alguien habló de «principio», tal vez porque aún no estuviera familiarizado con la mecánica cuántica, pero no es algo demasiado importante. Más delicado es lo que sucede con el segundo grupo de palabras, en las que hay diferencias de matiz para poner el acento sobre el sujeto o el objeto. Así, *incertidumbre* o *incerteza* implican que el sujeto no tiene un conocimiento seguro y claro de algo. Ateniéndose a este significado estricto hay quienes infieren que las desigualdades imponen un límite al conocimiento subjetivo sobre la naturaleza, pero no dicen nada sobre la propia naturaleza. De ahí a negar la posibilidad de cualquier conocimiento objetivo no hay más que un paso, que algunos han dado sin titubeos. No es esta la idea de los científicos; de lo contrario, ni el autor habría escrito este libro ni el lector estaría leyéndolo.

Heisenberg usó la palabra «ungenauigkeit», que se traduce como *imprecisión*. Esto hace referencia a resultados de una medida, y así es como a veces se explican las desigualdades. Para medir una magnitud en un laboratorio no se hace una única medida, sino un número de ellas, más o menos mayor, que permite determinar la precisión del resultado final. La imprecisión se relaciona con lo que en lenguaje técnico se llama *desviación cuadrática media*, es decir, la dispersión de los valores del observable en torno a su valor medio. Si se usa la palabra *imprecisión*, parece indicarse que las desigualdades imponen un límite a las medidas

que puedan realizarse en el laboratorio, y no es así. Cada magnitud implicada en las relaciones, como la posición y el momento de un electrón, pueden medirse separadamente con una precisión arbitraria, al menos en principio. Lo que postulan las desigualdades es que esta precisión arbitraria no se puede alcanzar en medidas simultáneas. Pero sucede que como la función de ondas representa una amplitud de probabilidad, se puede definir de manera precisa el valor medio de la posición y el momento, que se suelen representar con los símbolos $\bar{x}$ y $\bar{p}$, respectivamente, así como sus desviaciones cuadráticas medias, Δx y Δp, que corresponden a las raíces cuadradas de los valores medios de $(x-\bar{x})^2$ y $(p-\bar{p})^2$. De ahí que tenga sentido relacionar estas cantidades con una medida.

«Creo que la existencia de la "trayectoria" clásica puede formularse de forma sugerente así: La "trayectoria" solo existe cuando la observamos.»

— HEISENBERG EN SU ARTÍCULO SOBRE LAS RELACIONES DE INCERTIDUMBRE, 1927.

Como manera intuitiva de referirse a la relación de Heisenberg, en alemán se utiliza también la expresión «unschärferelation», que incluye la palabra *borrosidad*. Otra posibilidad es la de utilizar el término *indeterminación*, que no hace referencia ni a desconocimiento subjetivo ni a dificultades experimentales. Las desigualdades de Heisenberg muestran que la constante de Planck es la medida universal de la indeterminación introducida por la dualidad onda-partícula, por el hecho de seguir utilizando conceptos clásicos para describir el mundo cuántico.

CAPÍTULO 4

En defensa de la física teórica

Una vez establecidas sus bases, la mecánica cuántica se comenzó a aplicar de manera sistemática a otros campos de la física, tales como el enlace químico, el ferromagnetismo o la estructura de los núcleos atómicos. La creciente sombra del nazismo obligó a Heisenberg a destinar parte del crédito obtenido tras el Nobel de 1933 a impedir que la tóxica ideología decidiera sobre la validez de los descubrimientos científicos.

En octubre de 1927, cuando aún no había cumplido veintiséis años, Heisenberg fue nombrado profesor de Física Teórica en la Universidad de Leipzig. Allí permaneció dieciséis años hasta que se trasladó a la de Berlín. En su actividad científica se dedicó a aplicar la mecánica cuántica a diversos campos de la física. También inició una labor de divulgación de la mecánica cuántica y sus consecuencias filosóficas, actividad que mantuvo a lo largo de su vida. A partir de la llegada de los nazis al poder, Heisenberg dedicó gran parte de su tiempo a mantener el nivel científico de Alemania, a defender la física teórica e incluso a defenderse a sí mismo de los ataques de ciertos sectores nazis. Este capítulo abarcará el período de doce años, hasta el inicio de la Segunda Guerra Mundial.

LAS VÍAS CUÁNTICAS

La llegada de Heisenberg supuso una profunda renovación de la física en Leipzig. Atrajo a muchos jóvenes brillantes deseosos de avanzar por las nuevas vías abiertas por la mecánica cuántica. Entre sus estudiantes de doctorado encontramos a F. Bloch, R. Peierls, E. Teller y C. von Weizsäcker, y en la lista de los visi-

tantes postdoctorales aparecen E. Amaldi, U. Fano, E. Feenberg, L. Landau, E. Majorana, I. Rabi. L. Tisza, S.I. Tomonaga o V.F. Weiskopf. Son nombres todos muy conocidos por sus destacadas aportaciones a distintos campos de la física, reconocidas con el premio Nobel de Física en algunos casos.

Debido a su juventud, su manera de ser y su estilo de vida, Heisenberg mantenía relaciones muy cordiales con todos estos jóvenes, casi de su misma edad. Después de una intensa sesión de trabajo, el grupo se relajaba jugando al ping-pong en el sótano del edificio. Según cuenta Peierls, Heisenberg era muy buen jugador y ganaba casi todas las partidas; por eso causaba una gran sensación en el grupo la llegada de algún visitante chino capaz de hacerle frente. El trato con sus estudiantes no debía de ser muy diferente del que tenía con su grupo de exploradores, con el que mantuvo un contacto regular hasta que los nazis prohibieron los movimientos juveniles no afines. Aparte de las excursiones y viajes con sus exploradores, el tiempo que no dedicaba a la física y a sus estudiantes lo ocupaba la música. Todos los días practicaba con el piano durante varias horas en su apartamento, situado en el mismo edificio del instituto. La música permitió a Heisenberg un fácil acceso a las reuniones de la élite social y cultural de Leipzig, formada por juristas, médicos, profesores de universidad, editores, etc. Precisamente, en una velada musical de 1937 conoció a Elisabeth Schumacher, con quien se casó unos meses después del encuentro.

Las tesis de Bloch y de Peierls representaron el inicio de la moderna física del estado sólido, basada en el estudio de la dinámica cuántica de electrones en una red periódica de iones positivos. Heisenberg no publicó ningún artículo con sus estudiantes, pues como director se limitaba a sugerir, criticar y aconsejar, dándoles todo el crédito a ellos. Heisenberg hizo una aportación importante al problema del ferromagnetismo, que se va a tratar a continuación. Hay materiales, como el hierro, el cobalto o el níquel, que pueden adquirir una magnetización permanente al ser colocados en un campo magnético o al ser frotados con un imán. Las leyes del electromagnetismo, establecidas en el siglo XIX, permiten entender que las corrientes eléctricas puedan originar cam-









FOTO SUPERIOR IZQUIERDA:
La ceremonia de entrega del premio Nobel de Física a Heisenberg tuvo lugar el 10 de diciembre de 1933, aunque el premio le había sido adjudicado el año anterior.

FOTO SUPERIOR DERECHA:
Werner Heisenberg y Elisabeth Schumacher se casaron el 29 de abril de 1937, menos de tres meses después de su primer encuentro.

FOTO INFERIOR:
Asistentes a un congreso celebrado en 1930 en el Instituto de Física Teórica de Copenhague. En la primera fila, de izquierda a derecha: Klein, Bohr, Heisenberg, Pauli, Gamow y Landau.

pos magnéticos —algo que se utiliza en los electroimanes, como el que hace funcionar un timbre eléctrico— y que los campos magnéticos en movimiento produzcan corrientes —lo que se utiliza para la producción de electricidad en las centrales—. Las propiedades magnéticas de un material se atribuyeron a las corrientes eléctricas producidas por sus electrones, pero no pudo darse una explicación detallada del fenómeno hasta que se desarrolló la mecánica cuántica.

Ya hemos visto que el espín de los electrones está relacionado con sus propiedades magnéticas: los electrones se comportan como pequeñas brújulas o pequeños imanes, aunque con alguna complicación adicional por tratarse de objetos cuánticos. Si muchos de los electrones de un material orientan sus espines en una misma dirección, se producirá un campo magnético global, es decir, el material se magnetizará. El que la magnetización sea permanente o no depende de la interacción entre los electrones y de la estructura particular del material.

Recordemos ahora lo que hizo Heisenberg para aclarar el misterio del parahelio y el ortohelio. La función de onda de dos electrones es antisimétrica —cambia de signo— cuando se intercambian sus posiciones y sus espines, con lo que se asegura que dos electrones no puedan ocupar los mismos estados cuánticos, tal como requiere el principio de Pauli. Heisenberg demostró que en el átomo de helio existen dos tipos de función de onda: una cuya parte de espín es antisimétrica —el parahelio— y otra simétrica —el ortohelio—. ¿Y qué tiene que ver esto con el magnetismo? Para tener una magnetización permanente, todos los espines de los electrones han de estar orientados en la misma dirección, así que la parte de espín de la función de onda es simétrica: permanece igual si se intercambian dos espines cualesquiera. Por tanto, la parte espacial de la función de onda debe ser antisimétrica: ha de cambiar de signo al intercambiar las posiciones de dos electrones. Heisenberg demostró que en el cálculo de la energía asociada a la interacción de Coulomb entre los electrones aparece el mismo término que se obtiene con la física clásica más otro término de origen puramente cuántico, relacionado con la antisimetría de la función de ondas. En la jerga técnica se le llama *término de inter-*

cambio y es la clave para entender las propiedades magnéticas de la materia.

Entre los meses de marzo y octubre de 1929, Heisenberg fue invitado a dar conferencias, cursos y charlas en diversas universidades de Estados Unidos, Japón y la India. Aprovechó este largo viaje para hacer excursiones por los Grandes Lagos, el parque de Yellowstone, el Gran Cañón, viajar por Japón, China o acercarse al Himalaya. El curso que dio Heisenberg en la Universidad de Chicago fue publicado en forma de libro con el título *Los principios físicos de la teoría cuántica*, al que ya se ha hecho referencia en el capítulo anterior. Se trata de la revisión más influyente y más leída sobre la mecánica cuántica durante la década de 1930, y se sigue editando en la actualidad.

LA TEORÍA NUCLEAR

Poco después del descubrimiento del núcleo atómico, Rutherford hizo las primeras conjeturas sobre su estructura. El núcleo del átomo de hidrógeno está formado por un protón, que es una partícula de carga eléctrica positiva y con una masa mucho mayor que la del electrón. Rutherford sugirió que los núcleos más pesados estarían formados por electrones y protones, lo que ahora nos llama la atención. ¿Por qué supuso la presencia de electrones en el núcleo? En aquel momento se pensaba que dentro del núcleo solamente existía la interacción electromagnética. Si el núcleo solo contuviera protones, se rompería debido a su repulsión eléctrica. Además, esta hipótesis era la manera más simple de explicar la radiación beta, que son electrones emitidos por núcleos radiactivos. Rutherford también conjeturó que dentro del núcleo, un electrón podría formar un par con un protón. Como es natural, no se refería a un átomo de hidrógeno —su tamaño es cien mil veces mayor que el del núcleo—, sino que se trataría de una unión especial, a la que dio el nombre de *neutrón*. Hoy sabemos que las cosas no son así, pero es interesante mencionarlo porque muestra una vez más que los avances científicos empiezan a menudo por con-

jeturas más o menos lógicas que no siempre son ciertas; solo sobreviven las que superan criterios de coherencia y están de acuerdo con los resultados experimentales.

En marzo de 1932 el inglés Chadwick repitió, con algunas modificaciones, un experimento realizado por Bothe y Becker en Berlín y por el matrimonio Joliot-Curie en París. Al exponer una placa de berilio a la radiación alfa —que es un núcleo de helio—, se emitía un haz de partículas neutras. Su masa era unas 1,007 veces mayor que la del protón, y por eso podía extraer protones de un bloque de parafina; se puede asemejar a cuando una bola de billar choca frontalmente con otra: la primera se para y la segunda se desplaza con la misma velocidad. Chadwick llegó a la conclusión de que la partícula en cuestión era el neutrón conjeturado por Rutherford. Inmediatamente se intentó describir la estructura de un núcleo formado por protones y neutrones, aunque no se tenían las ideas muy claras sobre cómo proceder. Bohr pensaba que al igual que fue necesaria la teoría cuántica para explicar los fenómenos a escala atómica, también sería necesaria una nueva teoría para explicar los fenómenos a la escala nuclear, que es unas cien mil veces menor que la atómica.

Heisenberg mostró que bastaba aplicar la mecánica cuántica al sistema formado por protones y neutrones. Dado que la carga eléctrica de los protones hace que se repelan, tiene que haber una fuerza más intensa que mantenga unidos dentro del núcleo a protones y neutrones. Esta fuerza ha de actuar solo a distancias pequeñas; de lo contrario, el núcleo tendría un tamaño mucho mayor del que se observa. Del neutrón solo se sabía su existencia, y se discutía si era una unión especial de un protón y un electrón, o una nueva partícula elemental, pero Heisenberg no entró a discutir esa cuestión.

El átomo de hidrógeno tiene un isótopo que recibe el nombre de *deuterio*, cuyo núcleo contiene un neutrón y un protón. Heisenberg empezó considerando este núcleo, llamado *deuterón*, y vio una analogía con la molécula de hidrógeno ionizada H_2^+, formada por dos protones y un electrón. La estabilidad de esta molécula se debe al intercambio de este electrón entre los dos protones, que origina un término cuántico en la energía capaz de estabilizar la molécula. Recordemos que Pauli no consiguió describir esta mo-

lécula en el marco de la vieja teoría cuántica. La tesis de Teller fue el primer estudio completo basado en la mecánica cuántica.

Esta molécula puede imaginarse como un protón y un par protón-electrón, que constantemente cambian sus papeles al intercambiar el electrón. De manera análoga, Heisenberg supuso que en el deuterón también habría un intercambio entre el neutrón y el protón. Pero ¿cómo pueden cambiar sus papeles dos partículas distintas? Heisenberg propuso que neutrón y protón son dos estados cuánticos de una misma partícula, que desde 1941 se conoce como *nucleón*. Estos dos estados difieren en su carga eléctrica y en una pequeña proporción de la masa. Actualmente se dice que son dos estados del mismo *isospín* o *espín isotópico*. Una vez desarrollada esta idea en el deuterón, la aplicó a los núcleos más pesados, obteniendo algunos resultados clarificadores. Por ejemplo, demostró que los núcleos más ligeros (hasta unos

NOTACIÓN NUCLEAR

El núcleo de un átomo contiene protones y neutrones, cuyos números se indican con los símbolos Z y N, respectivamente. El átomo neutro contiene el mismo número Z de electrones. Se le llama número atómico, y de él dependen las características químicas de cada elemento. Como la masa de un protón o de un neutrón es más de 1800 veces mayor que la de un electrón, la masa de un átomo es, en una primera estimación, la suma de las masas de sus protones y neutrones. Por eso se define el número másico como $A = Z + N$. Los isótopos de un elemento difieren solo en el número de neutrones —o, lo que es lo mismo, en su número másico— pero todos ellos tienen las mismas propiedades químicas. Se utilizan varias notaciones para un mismo isótopo. La más completa hace intervenir el símbolo químico del elemento y los tres números anteriores. Se representa de la siguiente manera: ${}^{A}_{Z}\text{Símbolo}_{N}$. A menudo se suprime algún índice, porque es una notación redundante. Por ejemplo, las notaciones ${}^{238}_{92}U_{146}$, ${}^{238}_{92}U$ y ${}^{238}U$ se usan para el isótopo del uranio con número másico 238; incluso se escribe a veces U238, para evitar escribir números en posiciones no habituales. Quienes no recuerden los símbolos químicos, encontrarán más cómoda la notación Uranio-238. A veces se utiliza una notación sin símbolo químico, como (A, Z), sobre todo para escribir reacciones nucleares.

cuarenta nucleones), tienen aproximadamente el mismo número de protones que de neutrones, pero que los núcleos más pesados han de contener más neutrones que protones, para compensar la repulsión eléctrica entre estos últimos.

En conclusión, Heisenberg demostró la importancia del término cuántico de intercambio para explicar la estabilidad y propiedades de diversos sistemas, como el átomo de helio, el ferromagnetismo o los núcleos. Otros científicos, como Heitler y Pauling, mostraron su importancia para explicar el enlace químico.

LA ELECTRODINÁMICA CUÁNTICA

A finales de la década de 1920, la mecánica cuántica proporcionaba la base para entender los fenómenos atómicos, y la ecuación de Dirac describía la dinámica cuántica y relativista de un electrón en el átomo de hidrógeno. Pero aún quedaban elementos importantes que encajar. De la ecuación de Dirac, publicada en 1928, conviene destacar dos consecuencias importantes. El espín del electrón surge de forma natural, sin necesidad de incluirlo a mano. Y predice la existencia de una partícula idéntica al electrón, pero con carga eléctrica positiva, llamada *positrón* o *antielectrón*. Como anécdota, cabe decir que toda la literatura de ciencia ficción sobre la antimateria tiene aquí su punto de partida.

La principal fuente de información de lo que sucede en los átomos es la radiación electromagnética, que es emitida o absorbida cuando los electrones atómicos hacen sus saltos cuánticos entre estados estacionarios. Pero esta radiación no existe ni antes de ser emitida ni después de ser absorbida. Entonces ¿cómo se podía entender la emisión y la absorción de energía electromagnética por partículas cargadas? Había que establecer una conexión entre los electrones y la luz en el esquema de la mecánica cuántica. El primer paso lo dieron Pauli y Jordan en 1928 al describir las ondas electromagnéticas en términos de fotones, lo que se conoce como cuantificación del campo electromagnético. Todo parecía estar listo para llegar a una electrodinámica cuántica, o teoría cuán-

tica de campos para electrones, positrones y luz. Pero esta teoría no se formuló hasta al cabo de unos cuantos años debido a varios problemas que tardaron en resolverse. Aquí mencionaremos solo

LAS PARTÍCULAS ELEMENTALES EN LA DÉCADA DE 1930

Tras el descubrimiento del neutrón se pensaba que la materia estaba constituida por cuatro partículas elementales: electrón (e), protón (p), neutrino (ν, pronunciado «nu») y neutrón (n). El electrón y el protón son partículas con carga eléctrica, negativa y positiva respectivamente, cuyo valor absoluto define la carga eléctrica elemental ($-1{,}60 \cdot 10^{-19}$ culombios). Tal como sugieren sus nombres, el neutrino y el neutrón no tienen carga eléctrica. Asociadas a estas partículas están sus correspondientes antipartículas (cuyo símbolo es el mismo de la partícula, pero con una barra encima: $\bar{e}$, $\bar{p}$, $\bar{\nu}$, $\bar{n}$), de las que solo el antielectrón tiene un nombre específico: positrón. Un neutrón libre se desintegra como $n \rightarrow p + e + \bar{\nu}$. Sin embargo, el neutrón es estable cuando está unido a un núcleo, excepto si este contiene un número excesivo de neutrones. En tal caso, el proceso anterior corresponde a la desintegración beta de los núcleos, que se escribe: $(A,Z) \rightarrow (A,Z+1) + e + \bar{\nu}$.

El misterioso neutrino

Este modelo presentaba un problema importante. Hasta ese momento, la desintegración beta se concebía como el proceso en el que un núcleo (A,Z) se transformaba en otro núcleo (A,Z + 1), emitiendo un electrón. Las cuidadosas medidas efectuadas indicaban que la energía inicial era mayor que la adquirida por el núcleo final y el electrón emitido, lo que parecía contradecir el principio de conservación de la energía. Pauli sugirió que ello indicaba la existencia de una partícula, el neutrino, con una masa muy pequeña y que interacciona muy poco con la materia. Fue detectada por primera vez en la década de 1950, y aún no se sabe el valor de su masa, solo que ha de ser menor que dos mil millonésimas de la masa del protón. Interacciona poco con la materia: cada segundo nuestro cuerpo es atravesado por unos 10^{12} neutrinos, sin que notemos su presencia. Esta enormidad de neutrinos procede de las reacciones nucleares producidas en el interior de Sol. ¿Qué ha cambiado desde los años 1930? Hoy se sabe que protones y neutrones no son elementales, sino que están constituidos por quarks llamados u y d (protón p = uud, neutrón n = udd). Las cuatro partículas u, d, e, ν, y sus correspondientes antipartículas (similares a las partículas pero con cargas inversas) forman la familia de constituyentes de la materia ordinaria. Existen dos familias más, formadas por partículas análogas a la primera pero de mayor masa, que se manifiestan en experimentos realizados en el laboratorio o en reacciones producidas por los rayos cósmicos.

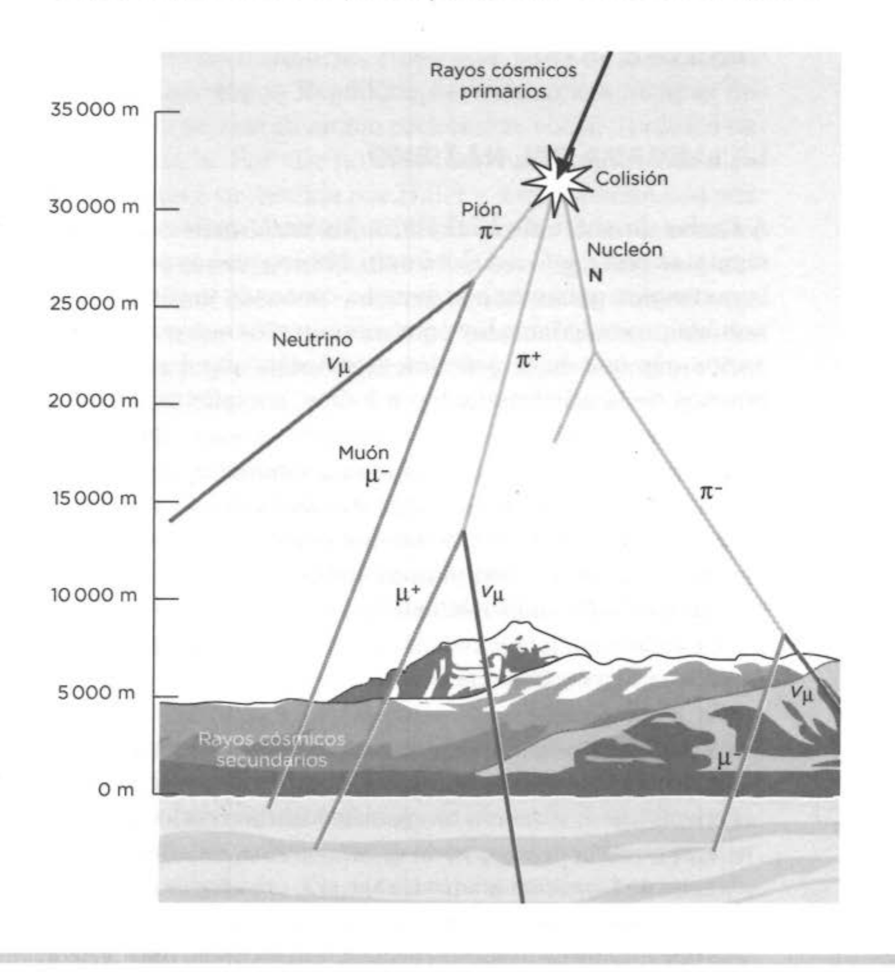
uno de ellos. Toda esfera cargada posee una energía electromagnética, llamada *autoenergía*, que es inversamente proporcional a su radio. Como todo indica que el electrón es una partícula puntual —de radio nulo—, su autoenergía es infinita. Si para evitarlo se supone que el radio del electrón es distinto de cero, se llega a un resultado incompatible con la relatividad. Así que en cualquier formulación aparecían unas desagradables cantidades infinitas que imposibilitaban cualquier cálculo, y no se sabía qué hacer con ellas.

Bohr seguía insistiendo en que era necesaria una nueva teoría para describir los fenómenos a la escala de las partículas elementales. En esta línea, Heisenberg sugirió que todo el universo podría ser como una enorme red cristalina. El espacio sería una red de minúsculas celdas cúbicas del tamaño de una partícula elemental. Si dichas celdas existieran constituirían una distancia mínima absoluta —una longitud universal—, por debajo de la cual la teoría actual dejaría de tener validez. Pero estas ideas generales no llevaban a nada concreto, y en 1931 Heisenberg le escribió a Bohr: «[...] He renunciado a involucrarme en cuestiones fundamentales, que son demasiado difíciles para mí». Sin embargo, a finales de 1933 hubo novedades relacionadas con los rayos cósmicos que le hicieron cambiar de opinión.

En Cambridge, el británico Patrick Blackett y el italiano Giuseppe Occhialini descubrieron que cuando un rayo cósmico de muy alta energía llegaba a su detector, se producía un «chaparrón» de partículas, al parecer creadas por la colisión del rayo cósmico con un núcleo del plomo que cubría el detector. Poco después de este descubrimiento, el estadounidense Carl David Anderson descubrió el positrón predicho por la ecuación de Dirac. Cuando un electrón y un positrón se encuentran, ambos desaparecen y se emiten dos fotones energéticos en direcciones opuestas, lo que verifica la ecuación más famosa de la física $E=mc^2$. Y al revés: un fotón de energía suficiente crea un par electrón y positrón; por razones de conservación del momento, esta creación requiere la presencia de un núcleo. Ambos descubrimientos renovaron el interés de Heisenberg por la electrodinámica cuántica, y esperaba relacionar su hipotética longitud universal con la longitud de ondas característica de los fotones que aparecen en

LOS RAYOS CÓSMICOS

Los rayos cósmicos son partículas cargadas que llegan a la Tierra desde el espacio exterior; en su mayoría se trata de protones provenientes del Sol. Los rayos cósmicos fueron la única manera de estudiar colisiones de partículas a altas energías hasta que llegaron los aceleradores de partículas. Cuando un protón de los rayos cósmicos colisiona con el núcleo de un átomo en las capas altas de la atmósfera, se produce una cascada de reacciones nucleares que originan un gran número de partículas. En la figura se muestra un ejemplo.



los chaparrones cósmicos. En esos «chaparrones» aparecían nuevas partículas, empezando por las más ligeras, llamadas *piones* y *muones*. La descripción de la multitud de partículas y antipartículas que podían originarse era un serio desafío, pues había que tener en cuenta todas las posibles interacciones en juego, todos los posibles procesos con sus respectivas probabilidades. Heisenberg no pudo formular una teoría cuántica de campos exenta de problemas y ambigüedades; es algo que se empezó a hacer en la década de 1940. Pero las teorías actuales utilizan muchos de los elementos básicos elaborados por el científico alemán.

LA LLEGADA DEL NAZISMO

A finales de enero de 1933 Hitler fue nombrado canciller de Alemania, es decir, jefe del Gobierno. Obtuvo plenos poderes del parlamento para gobernar por decreto, obviando la constitución, y en seguida promulgó una ley para «restaurar la carrera de los funcionarios», lo que en la práctica significaba expulsar de todos los puestos de la administración a judíos, socialistas, comunistas y desafectos al régimen. Entre ceses, jubilaciones forzadas y dimisiones, las universidades perdieron globalmente un 15% del profesorado, y algunos centros —como el Instituto de Matemáticas de Gotinga— quedaron prácticamente desmantelados.

Einstein se encontraba en Estados Unidos y declaró que nunca regresaría a una Alemania gobernada por los nazis. Dimitió de todos sus cargos y renunció a seguir siendo miembro de la Academia Prusiana de Ciencias:

> El principal objetivo de una academia es proteger y enriquecer la vida científica de un país. Sin embargo, por lo que sé, las sociedades científicas de Alemania han permanecido pasivas y silenciosas mientras un número importante de académicos, estudiantes y profesionales de formación académica han sido privados de empleo y medios de subsistencia. No quiero pertenecer a ninguna sociedad que se comporte de esta manera, incluso si lo ha hecho bajo presión.

Había científicos que eran nazis o simpatizantes declarados. Es el caso de dos físicos galardonados con el premio Nobel: Philipp Lenard —en 1905, por sus trabajos sobre el efecto fotoeléctrico— y Johannes Stark —en 1919, por su descubrimiento del desdoblamiento de las rayas espectrales en presencia de un campo eléctrico—. En 1924 ambos habían hecho público su apoyo a Hitler, encarcelado tras su intentona de golpe de Estado. Stark se afilió al partido nazi en 1930, y, como veremos, tuvo una gran influencia en la política científica y universitaria durante unos años. Pascual Jordan, coautor de la mecánica matricial, se afilió en mayo de 1933.

La mayoría de los científicos, como gran parte de la sociedad alemana, pensaban que la República de Weimar era incapaz de sacar al país de la penosa situación económica, social y política en la que se encontraba. Por ello no veían con malos ojos la idea de renovación nacional prometida por Hitler y simpatizaban con sus objetivos nacionalistas. Confiaban en que pronto desaparecerían lo que consideraban excesos iniciales del nuevo régimen y mejoraría la situación. Esta fue, con matices, la actitud de Heisenberg. Así, intentó convencer a Born, cesado por tener abuelos judíos, de que no abandonara Alemania. En el mes de junio le escribía:

> Sé que entre los que están a cargo de la nueva situación política hay hombres por quienes vale la pena aguantar. Ciertamente, en el transcurso del tiempo las cosas espléndidas se separarán de las odiosas.

Le decía que las leyes raciales afectarían solo a los menos importantes, por lo que «la revolución política tendrá lugar sin daños para la física de Gotinga». La información a que hace referencia debió de obtenerla por Weizsäcker, pues su padre era un alto funcionario que llegó a formar parte del Gobierno. Born, afortunadamente para él y su familia, no hizo caso de esos consejos y se exilió. Schrödinger fue uno de los pocos científicos que decidieron abandonar voluntariamente Alemania por estar en desacuerdo con la situación política. Heisenberg no lo entendió, «ya que ni es judío ni está en peligro».

También hubo científicos, los menos, que manifestaron como pudieron su oposición al nazismo. Los más conocidos, como Planck

o Laue, intentaron que la situación de la ciencia en Alemania no se viera demasiado afectada. Laue se opuso pública y tenazmente a los intentos de Stark por hacerse con el control de la física alemana. Planck, a pesar de sus setenta y cinco años, tomó iniciativas arriesgadas. Consiguió una audiencia con Hitler para hacerle ver el enorme daño que la política antisemita representaba para la universidad alemana; la respuesta fue una amenaza de ingreso en un campo de concentración. Heisenberg veía en Planck un símbolo de la respetada tradición y logros de la ciencia alemana, y a

MAX BORN



Born (1882-1970) fue matemático de formación. Estudió en las universidades de Breslau (actualmente, Wroclaw, en Polonia), Heidelberg y Zúrich. En la Universidad de Gotinga obtuvo su doctorado (1906) y su habilitación (1909). También cambió su orientación, dedicándose a la física teórica. Después de ejercer como profesor en Berlín y Frankfurt, en 1921 volvió a Gotinga como catedrático de física teórica. Muchos de los estudiantes que hicieron la tesis doctoral con Born se convirtieron después en científicos famosos, entre ellos, Victor Weisskopf, J. Robert Oppenheimer, Maria Goepper-Meyer y Max Delbrück. En 1933 huyó de la Alemania nazi debido a sus orígenes judíos. Tras ser contratado en Cambridge, fue nombrado catedrático de física matemática en la Universidad de Edimburgo. A pesar de su crucial contribución, a menudo se ignora el nombre de Born entre los fundadores de la mecánica cuántica. Para algunos, el premio Nobel de 1932 no debió haber sido concedido solamente a Heisenberg. El reconocimiento tardío le llegó con el premio Nobel de 1954 «por su investigación fundamental en mecánica cuántica, especialmente por su interpretación estadística de la función de ondas».

su vez Planck veía en Heisenberg una esperanza para el futuro de la física alemana. Sin oponerse nunca abiertamente al régimen nazi, Heisenberg se unió a los esfuerzos de Planck y Laue para mantener la autonomía de la ciencia alemana frente a la hostilidad de los nazis contra los científicos.

En noviembre de 1933, la Liga de profesores nazis convocó una manifestación para apoyar la decisión del Gobierno de abandonar la Sociedad de Naciones. Heisenberg rechazó participar en la manifestación y su organizador, que no era otro que Stark, intentó levantar a los estudiantes en su contra. La cosa no fue a mayores, porque aquello coincidió con la concesión del premio Nobel de Física a Heisenberg. Unos meses más tarde, el activista Stark propuso que todos los premios Nobel alemanes enviaran un telegrama de adhesión a Hitler. Planck, Laue, Nernst y Heisenberg se negaron a hacerlo, con el argumento de que, aunque personalmente pudieran estar de acuerdo con el telegrama, no es el papel de los científicos opinar como tales sobre asuntos políticos. Stark les replicó agriamente que ya hacían política cuando en sus clases enseñaban la teoría de la relatividad y hablaban de Einstein.

En 1935 hubo otra purga de funcionarios. Varios profesores de Leipzig, entre los que estaba Heisenberg, mostraron en el claustro su desacuerdo, lo que les valió una reprimenda. El rector de la universidad presionó a Heisenberg para que se incorporase al ejército como oficial de reserva, con el fin de dejar patente su lealtad al régimen, algo que hizo unos meses más tarde. Como única alternativa política y moral Heisenberg pensó en dimitir de su cargo en la universidad, y decidió consultarlo con Planck. Para este —según contó Heisenberg años después—, la dimisión como protesta no era la solución, pues no tendría ningún efecto práctico y «ahora todos nosotros hemos de mirar hacia el futuro». Tenían que volver a lo que hicieron tras la Primera Gran Guerra: disociar la buena cultura alemana de la coyuntura política, separar las intenciones de las apariencias y mantenerse en sus puestos y responsabilidades. Heisenberg concluyó que tenía que aguantar hasta que pasara lo peor y formar lo que llamó «islas de estabilidad», en las que preservar los valores que defendía en medio de un ambiente político con el que tenía que convivir.

LOS PREMIOS NOBEL DE FÍSICA DE 1932 Y 1933

En diciembre de 1933 se concedieron los premios Nobel de Física. Heisenberg recibió el de 1932, que había sido aplazado, mientras que Schrödinger y Dirac compartieron el de 1933. En cuanto se hizo pública la concesión del premio Nobel a Heisenberg, Born le escribió una carta de felicitación. He aquí la respuesta:

> Querido Herr Born,
> Si no le he escrito en todo este tiempo y no le he agradecido sus felicitaciones, ha sido en parte por la mala conciencia que tengo con respecto a usted. El hecho de que solo yo reciba el premio Nobel por el trabajo hecho en Gotinga en colaboración —usted, Jordan y yo—, este hecho me deprime y no sé qué escribirle. Naturalmente, estoy contento de que nuestros esfuerzos comunes sean apreciados ahora, y disfruto al recordar la agradable época de la colaboración. También creo que todo buen físico sabe lo importante que ha sido su colaboración y la de Jordan para la estructura de la mecánica cuántica, y esto no cambia por una decisión equivocada desde fuera. Con todo, yo mismo no puedo hacer más que agradecerle de nuevo su preciosa colaboración y sentirme un poco avergonzado.
>
> Con saludos cordiales,
> W. Heisenberg

Desde Estocolmo, Heisenberg escribió a Bohr sus sentimientos:

> Respecto al premio Nobel, tengo mala conciencia frente a Schrödinger, Dirac y Born. Schrödinger y Dirac se merecen un premio completo, al menos como yo, y yo lo habría compartido encantado con Born, ya que también hemos trabajado juntos.

Heisenberg hizo referencia a esta ambigua situación a finales de 1947, cuando escribió una carta en favor de Ernst von Weizsäcker, el padre de su amigo, juzgado y condenado en Núremberg. Aprovechó el momento para poner en claro algunas de sus ideas en un manuscrito que se conoció después de su muerte. Aunque siempre hay que matizar este tipo de juicios retrospectivos sobre uno mismo, el manuscrito da algunas claves sobre su actitud en este período. Decía que los alemanes no judíos opuestos a las medidas nazis estaban forzados a escoger entre dos opciones de oposición, que llamó activa y pasiva. La oposición pasiva significaba

emigrar al extranjero o abandonar toda responsabilidad, y ambas opciones eran para él equivalentes a una deserción. La oposición activa significaba una oposición directa, con resistencia armada incluida, algo que Heisenberg pensaba que estaba condenado al fracaso. Su opción fue adquirir cierto nivel de influencia: «Es importante dejar claro que este era de hecho el único camino para cambiar realmente algo». Su vida se convirtió en una confrontación diaria con contradicciones éticas y compromisos con el régimen para «cambiar realmente algo». Uno de los aspectos más controvertidos de Heisenberg es esa actitud ambigua, que para muchos de sus colegas y amigos en el extranjero no se distinguía de una abierta colaboración con los nazis.

EN DEFENSA DE LA FÍSICA TEÓRICA

En la década de 1920, Lenard y Stark iniciaron una campaña contra el judaísmo en la ciencia, centrada en Einstein y en la teoría de la relatividad. Recordemos que para los sectores alemanes más derechistas, el armisticio de 1918 fue debido a una traición de la clase política, y en particular de los judíos. Einstein no solo era judío, sino también un pacifista que se había negado a firmar el manifiesto de 1914 y además se había opuesto públicamente al nazismo. Cuando en 1933 el antisemitismo se convirtió en oficial y legal, científicos como Lenard y Stark quisieron imponer en Alemania la «Deutsche Physik» (física alemana), libre de cualquier influencia judía. La mayoría de físicos no les siguieron, porque pensaban que las discusiones en física se deciden mediante argumentos científicos, pero pocos se atrevieron a enfrentarse a ellos públicamente.

Lenard publicó un libro titulado precisamente *Deutsche Physik*. Aunque se trataba de un libro de física general, el largo prefacio estaba dedicado a establecer la diferencia entre la «física alemana» y la «física judía». En él aparecen afirmaciones como las siguientes: la ciencia verdadera es experimental y realista, causal e intuitiva, inductiva, busca la naturaleza y la realidad, y es de

origen fundamentalmente nórdico. Por el contrario, la ciencia judía es teórica y formal, probabilista y no intuitiva, esclava de las matemáticas, indiferente a la naturaleza y a la realidad, y se pretende internacional. La división entre física clásica y física moderna es solo una astucia de la física judía, pues «el judío pretende crear contradicciones por doquier y separar las conexiones, para que el pobre alemán, que cae pronto en las trampas, pierda cualquier posibilidad de saber dónde está». Estas frases permitirán entender el conflicto en que se vio envuelto Heisenberg cuando Stark lo tomó como blanco de sus ataques.

El motivo inicial fue la jubilación de Sommerfeld. En el verano de 1935 la Universidad de Múnich propuso un único candidato, Heisenberg, para la vacante. En una situación normal habría sido designado, pero Stark consiguió paralizar el nombramiento. Además, en un discurso público dijo que aunque se habían liberado de Einstein, quedaban sus amigos y partidarios, que seguían actuando en su nombre, como Planck, Laue «y el teórico formalista Heisenberg, espíritu del espíritu de Einstein, que quiere ser ahora recompensado con una cátedra». A partir de ese momento, llamar a alguien «espíritu del espíritu de Einstein» era equivalente a acusarle de enemigo del régimen.

A finales de 1936, en el periódico oficial del partido nazi apareció el artículo «Física alemana y física judía», que recogía argumentos del prefacio de Lenard. Rechazaba por opacas y formalistas las teorías de la relatividad de Einstein, la mecánica matricial de Heisenberg y la mecánica ondulatoria de Schrödinger, y acababa pidiendo que esta «física judía» fuera eliminada de las universidades. En junio de 1937 se publicó el artículo «Los judíos blancos en la ciencia» en el periódico oficial de las SS. Judíos blancos eran aquellos alemanes que, sin ser judíos, propagaban el espíritu judío, y por ello eran doblemente peligrosos. Heisenberg fue designado como el principal representante del «espíritu de Einstein en la nueva Alemania», y se enumeró una larga lista de acusaciones e infamias contra él. Hubo cartas en la prensa pidiendo que se le internara en un campo de concentración, por traidor a la raza y al país. Estos ataques empezaban a ser una amenaza directa a su integridad física. Así las cosas, Heisenberg decidió escribir a Himmler, el jefe

de las SS, mostrándose dispuesto a dejar la universidad si el artículo reflejaba la opinión oficial de las SS; de lo contrario, pedía el cese de la campaña. Aprovechó que su madre conocía desde la infancia a la madre de Himmler, y le hizo llegar una carta por esta vía, que al menos garantizaba la entrega a su destinatario. Al cabo de unos meses Himmler pidió a Heisenberg un informe detallado sobre la física teórica, y al mismo tiempo ordenó abrir una investigación sobre su fiabilidad política. Esta investigación duró ocho meses, y Heisenberg tuvo que acudir a sesiones de interrogatorios de las SS, algunas de ellas en una prisión.

> «Ya sabe usted que me sería muy doloroso dejar Alemania; no quiero irme más que en caso de absoluta necesidad.»
>
> — Heisenberg en una carta a Sommerfeld fechada en abril de **1938**.

La investigación de las SS acabó favorablemente para Heisenberg. Era considerado un típico ejemplar de profesor apolítico, pero siempre dispuesto a defender a Alemania, como ya demostró en 1919 al participar en el aplastamiento de la República Soviética de Baviera y en 1935 al alistarse como reservista. Decía el informe que si bien su formación científica se basó en una metodología judía, poco a poco «se ha acercado al modo de pensar ario intuitivo», y ahora «afirma que la teoría física no es más que una hipótesis que permite al físico experimental interrogar a la naturaleza». En julio de 1938, Himmler ordenó que cesaran los ataques contra Heisenberg, pero le advirtió por carta: «[...] Considero mejor que en el futuro distinga usted ante su audiencia entre los resultados de la investigación científica y la actitud personal y política de los científicos implicados». En otras palabras, podía hablar de relatividad, pero no de Einstein.

Poco después de recibir esta respuesta, Heisenberg fue movilizado durante unos meses y enviado a la frontera con Checoslovaquia, durante la llamada Crisis de los Sudetes, que acabó con la anexión alemana de esta región checoslovaca. Por otro lado, si bien declinó la influencia de Stark, la rehabilitación definitiva de Heisenberg no llegó hasta 1942, cuando ya estaba involucrado en el pro-

grama nuclear alemán. Antes tuvo que celebrarse una reunión entre partidarios y oponentes a la física aria para tomar una decisión de compromiso: se aceptó la física teórica y la enseñanza de la relatividad, pero se mantuvo la prohibición de mencionar el nombre del «judío Einstein». El tema de fondo no era, claro está, una académica discusión epistemológica, sino una ideología racista.

Heisenberg evitó en todo momento entrar en una discusión ideológica. En sus artículos o informes, en sus charlas ante industriales, ingenieros, militares o altos funcionarios, Heisenberg siempre insistió en que la existencia de una física teórica de alto nivel —lo que incluye la física moderna— era fundamental para la formación de los futuros físicos y para la colaboración fructífera entre ciencia y tecnología.

CAPÍTULO 5

La fisión nuclear y la guerra

Las dos guerras mundiales que caracterizaron al siglo XX recurrieron de forma intensiva a la ciencia y a la tecnología, lo que ha suscitado debates recurrentes sobre la responsabilidad moral de los científicos. Durante la Segunda Guerra Mundial, Alemania fue el primer país en poner en marcha un proyecto nuclear, en el que Heisenberg tuvo un papel destacado. Esta época es la más controvertida de su vida, una controversia que se ha singularizado en su visita a Copenhague en 1941.

Durante la primavera y el verano de 1939, científicos de Alemania, Gran Bretaña y Estados Unidos informaron a sus respectivas autoridades políticas y militares sobre un posible explosivo que sería un millón de veces más potente que cualquier otro conocido. Esta inusual actividad estaba motivada por la inminencia de una guerra que empezó efectivamente el 1 de septiembre, cuando Alemania invadió Polonia. La Segunda Guerra Mundial trajo consigo una colaboración sin precedentes entre ciencia básica, ciencia aplicada y tecnología, que condujo a realizaciones como el radar, las bombas volantes V1 y V2 o la bomba atómica. A las pocas semanas del inicio de la guerra, Heisenberg fue movilizado por el ejército para participar en el desarrollo del programa nuclear alemán. Se trata de la época más controvertida de la vida de Heisenberg, que incluye su visita a Bohr en la Copenhague ocupada por los nazis.

DEL NEUTRÓN A LA FISIÓN NUCLEAR

El descubrimiento del neutrón en 1932 fue la pieza fundamental para entender la estructura de los núcleos. El italiano Enrico Fermi (1901-1954) vio en seguida que el neutrón, al no tener carga eléctrica, puede penetrar fácilmente dentro de los núcleos. Em-

LISE MEITNER

Lise Meitner (1878-1968) se doctoró en la Universidad de Viena en 1905. Fue la segunda mujer que obtuvo un doctorado en Física en Austria. Con el apoyo financiero de su familia, en 1907 se fue a Berlín a estudiar con Planck y casi inmediatamente empezó una fructífera colaboración con Otto Hahn, que culminó en 1917 con el descubrimiento del protactinio, motivo por el que fueron propuestos varias veces para el premio Nobel. En 1926 fue nombrada profesora por la Universidad de Berlín, lo que la convirtió en la primera mujer en Alemania en alcanzar tal puesto académico. En la década de 1930 inició con Hahn los experimentos que condujeron al descubrimiento de la fisión nuclear. La anexión de Austria en 1938 hizo de ella una ciudadana alemana y, por tanto, afectada por las leyes raciales debido a su origen judío. Huyó de Alemania en el momento justo, pues pocos días después llegó al Instituto Káiser Wilhelm de Berlín una carta del ministerio en el que preguntaba por el «porcentaje de sangre judía» de la profesora Meitner. Después de pasar por Holanda, Meitner fue contratada en Suecia, con un salario más bien modesto y casi sin medios de trabajo. Rehusó la oferta de participar en el Proyecto Manhattan («Nunca haré nada por fabricar una bomba»). En 1947, a punto de cumplir los setenta años, la Universidad de Estocolmo la nombró profesora. La biografía de Meitner está plagada de episodios que ilustran la resistencia de la sociedad en general a aceptar la incorporación de mujeres al mundo universitario.



prendió un estudio sistemático irradiando todos los núcleos de la tabla periódica con una fuente de neutrones y, como esperaba, encontró nuevos isótopos radiactivos. Cuando llegó al uranio, el elemento más pesado en la naturaleza, creyó que se habían formado nuevos elementos con Z = 93 y 94 (el uranio tiene Z = 92), es decir, elementos transuránicos. Pero el grupo de Fermi no dispo-

nía de medios ni de experiencia suficientes para identificar estos nuevos elementos sin ambigüedad. En Berlín, la larga y fructífera colaboración entre una física nuclear y un radioquímico era más adecuada para ello. Las investigaciones de la austriaca Lise Meitner y el alemán Otto Hahn eran muy valoradas desde que descubrieron el protactinio en 1917. Ahora, por iniciativa de Meitner se dedicaron a la búsqueda de elementos transuránicos. Meitner preparaba la irradiación de uranio con neutrones, Hahn separaba por métodos químicos los productos resultantes de la irradiación, y Meitner caracterizaba las radiaciones emitidas por estos productos. Pero a la larga surgió algo inesperado.

A finales de 1938, Hahn y su joven colaborador Strassman encontraron bario entre los productos resultantes, algo sorprendente porque su número atómico Z = 56 no hace de él un elemento transuránico. Meitner no pudo participar en este experimento pues, debido a sus antecedentes judíos, tuvo que abandonar Alemania unos meses antes, cuando Austria fue anexionada por los nazis y se vio sometida a las leyes raciales en vigor. Sin embargo, refugiada en Suecia, mantenía correspondencia regular con Hahn y este le informó de sus resultados: «Nuestro "isótopo de radio" se comporta como el bario [...] Tal vez puedas proponernos alguna explicación fantástica». Dio la casualidad de que esta carta le llegó al tiempo que un sobrino suyo, Otto Frisch, fue a pasar con ella las vacaciones de fin de año. Frisch también era físico —estaba en el instituto de Bohr—, así que tía y sobrino pasaron sus vacaciones dándole vueltas a los resultados de Hahn. Lograron explicarlos basándose en un modelo reciente en el que un núcleo se asimila a una gota de un líquido.

En una gota, la atracción global de sus átomos los mantiene unidos, pero al no estar estos en posiciones fijas, la forma de la gota no es fija. No obstante, para modificar su forma —para aumentar su superficie— se necesita aportar cierta energía, caracterizada por la tensión superficial. Algo parecido sucede con los núcleos: los nucleones —protones y neutrones— se mantienen unidos dentro del núcleo, que puede deformarse como la gota de cualquier líquido. A ello hay que añadir la repulsión eléctrica entre los protones. Imaginemos por un momento un núcleo de uranio (Z = 92) como la

unión de un núcleo de bario (Z = 56) y otro de kriptón (Z = 36). En esta unión hay un equilibrio entre la atracción nuclear global que los mantiene unidos, la repulsión eléctrica que tiende a romper la gota y la tensión superficial que se opone a un aumento de la superficie. Pero este equilibrio puede alterarse al añadir un neutrón más, y el núcleo inicial puede efectuar vibraciones y acabar por romperse para formar los dos núcleos más pequeños, es decir, con valor de Z menor que el original, como observaron Hahn y Strassmann. A este proceso de ruptura del núcleo, Meitner y Frisch le dieron el nombre de *fisión nuclear*. Estimaron también la energía liberada en el proceso de fisión de un núcleo, que es enorme en comparación con la que se libera en una reacción química entre dos átomos.

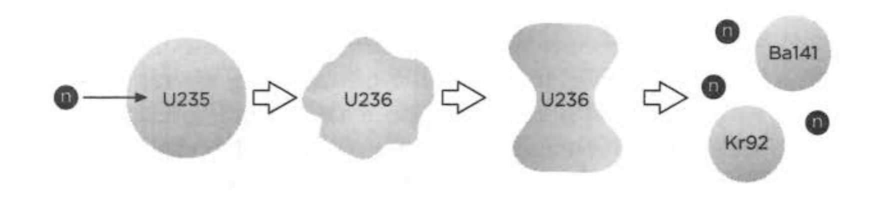
Cuando Frisch regresó a Copenhague, informó de todo ello a Bohr, justo cuando este salía de viaje para Estados Unidos. A finales de enero de 1939, la noticia de la fisión nuclear fue conocida por todo el mundo, y en diversos laboratorios se hicieron experimentos para verificar los resultados. Se vio que en cada fisión se emiten varios neutrones, unos 2,4 de promedio, que a su vez pueden provocar la fisión de más núcleos de uranio. Este proceso multiplicativo de los neutrones puede producir una reacción en cadena, capaz de liberar en muy poco tiempo una enorme cantidad de energía. Un dato a retener es que la fisión completa de un kilogramo de uranio proporciona la misma energía que la explosión de unas 10 000 toneladas de TNT. La inminencia de una guerra hizo que la fisión nuclear cobrara una gran importancia.

Los aspectos teóricos más importantes de la fisión fueron estudiados por Bohr, en colaboración con el estadounidense Wheeler, en un artículo escrito en el mes de junio. La rapidez con que se hizo el estudio refleja el interés general por este nuevo proceso. De manera muy resumida, la cuestión es así. El isótopo U238, que es el más abundante (99,3 %), se fisiona difícilmente y solo si es bombardeado por neutrones muy energéticos. Es más probable que la absorción de un neutrón produzca el isótopo U239. Sin embargo, los neutrones de cualquier energía pueden romper el más escaso isótopo U235, aunque es más fácil hacerlo con neutrones lentos. Como los neutrones emitidos en una fisión tienen energías muy diversas, si se pretende que estos produzcan

la fisión de otro U235 hay que frenar a los neutrones más energéticos para que no sean absorbidos por el U238. Para ello hace falta un moderador, es decir, una sustancia que frene a los neutrones sin absorberlos; de este modo se puede controlar la reacción en cadena para aprovechar la energía liberada tal como se hace en un reactor nuclear. Pero si el uranio se enriquece en U235 habrá un mayor número de fisiones, y si se dispone de U235 puro ni siquiera haría falta moderar a los neutrones, pues todos contribuyen a su fisión. Además, existe una masa mínima de U235, llamada *masa crítica*, para que la reacción en cadena se mantenga una vez iniciada, que es lo que conviene si se pretende fabricar una bomba. En 1939 se desconocía el valor de esta masa, y las estimaciones oscilaban entre unos cien kilogramos y varias toneladas. Dado que

VÍAS DE FISIÓN

Cuando un núcleo de U235 captura un neutrón se forma el isótopo inestable U236, que efectúa diversas oscilaciones de forma hasta que acaba por romperse en dos núcleos más pequeños y algunos neutrones. El número de posibles modos de fisión es del orden de varios centenares, aunque no todos son igual de probables. Las vías más probables, cerca del 85% de los casos, originan los pares de isótopos bario(Z=56)-kriptón(Z=36), cesio(Z=55)-rubidio(Z=37), xenón(Z=54)-estroncio(Z=38), yodo(Z=53)-iterbio(Z=39) y teluro(Z=52)-circonio(Z=40), pero cada par contiene a su vez varias decenas de posibilidades, dependiendo del reparto de los neutrones entre estos isótopos. Prácticamente todos los núcleos formados son inestables porque tienen un exceso de neutrones y se desintegran emitiendo radiación alfa o beta, además de la radiación gamma que se puede emitir también para liberar el exceso de energía que contienen.



la separación del U235 es un proceso complicado y costoso, que no puede realizarse por medios químicos, muchos físicos pensaban que la bomba era solo una quimera teórica, sin posibilidad práctica de realizarse.

EL CLUB DEL URANIO

Durante el verano de 1939, Heisenberg realizó una visita a Estados Unidos y, como es natural, habló con sus colegas sobre la fisión, la novedad del momento. Muchos científicos pensaban que tendrían que intervenir en la inminente guerra, y la posibilidad de una nueva bomba estaba en la mente de todos. Los amigos de Heisenberg le instaban a que se instalara en Estados Unidos, aprovechando las ofertas que le hacían varias universidades, pero él respondía que en esos momentos su lugar estaba en Alemania. Algunos entendieron aquello como muestra de su disposición a colaborar con el régimen nazi.

Al iniciarse la guerra, Alemania era el único país con un proyecto militar para desarrollar las posibilidades de la energía nuclear. El ejército alemán se interesó en esta cuestión desde abril de 1939. A primeros de septiembre se constituyó lo que de manera informal se llamó el Club del Uranio (Die Uranverein), con el objetivo de analizar las posibilidades prácticas ofrecidas por la fisión para crear una bomba y para construir un motor que pudiera impulsar barcos y submarinos. En realidad, y por extraño que parezca, el proyecto alemán carecía de organización jerárquica estricta y de planificación común. Los diez o doce laboratorios que trabajaron en el proyecto dependían de organismos distintos y, al no haber coordinación efectiva entre ellos, a menudo competían entre sí por los suministros. Había incluso un laboratorio privado, dirigido por Manfred von Ardenne, que estaba financiado en parte por el Ministerio de Correos. De todos modos, la bomba atómica fue siempre algo marginal para el ejército alemán, que confiaba más en una guerra relámpago para conseguir la victoria.

A finales de septiembre, Heisenberg fue movilizado y destinado al Club del Uranio, donde se encontró a científicos como Geiger, Bothe, Debye, Hartek, Hahn o Weizsäcker. Su primer trabajo fue preparar un informe sobre la fisión nuclear y sus posibilidades prácticas de utilización. Dicho documento se dividió en dos partes, enviadas en diciembre de 1939 y en febrero de 1940, y sentó las bases teóricas del proyecto alemán. Heisenberg hablaba de una «máquina de uranio» para referirse tanto a un reactor nuclear como a una bomba atómica. El reactor era un paso necesario para verificar que una reacción en cadena era posible y para llevar a cabo los estudios oportunos sobre la fisión y la preparación de un arma atómica.

> «Tal vez los humanos reconoceremos un día que realmente poseemos el poder de destruir la Tierra por completo, que podemos traer sobre nosotros un "último día" o algo muy parecido.»
>
> — Heisenberg, en una carta al historiador H. Heimpel, octubre de 1941.

El científico alemán estudió posibles configuraciones óptimas de la «máquina», para garantizar que se escapara el menor número de neutrones y se pudiera mantener una reacción en cadena. Sus prototipos consistían en capas alternadas de uranio metálico y de un moderador, en una geometría esférica o cilíndrica. Heisenberg descartó como moderador el carbono, en forma de grafito, basándose en medidas efectuadas por Bothe. No se le ocurrió que el grafito utilizado pudiera contener impurezas, como efectivamente sucede, y sugirió en cambio usar como moderador agua pesada, en la que el hidrógeno es reemplazado por su isótopo deuterio. Ese fue un error que no cometieron los aliados, pues el grafito, incluso con un elevado grado de pureza, es más fácil de obtener que el agua pesada. La única fábrica del mundo que producía agua pesada era la central de Vermok, en Noruega, a un ritmo de unos 300 litros al mes. Los alemanes no se aseguraron el suministro hasta la ocupación de Noruega en abril de 1940, aunque la producción se veía interrumpida por ataques de la resistencia noruega y bombar-

deos aliados, que la destruyeron en 1943. Poco después de su informe, Heisenberg dirigió la construcción de un prototipo en Leipzig y asesoró la de otro en Berlín.

Desde el principio se vio que el enriquecimiento en U235 es una tarea colosal. Se trata de separar por medios físicos los isótopos U238 y U235, basándose en la pequeña diferencia de sus masas, usando para ello un difusor gaseoso, una ultracentrifugadora o un espectrógrafo de masas. Pero los intentos en el laboratorio solo conseguían rendimientos miles o millones de veces inferiores a las cantidades de U235 que se creían necesarias. Las estimaciones de Heisenberg para la masa crítica de U235 oscilaban desde unos 20 kg («el tamaño de una piña tropical») hasta varias toneladas.

Pronto surgió una alternativa al U235, descubierta al mismo tiempo en Alemania y en Estados Unidos. Cuando el isótopo poco fisible U238 captura un neutrón se convierte en el isótopo U239, que se desintegra en el elemento $Z = 93$, que hoy llamamos neptunio Np239. Weizsäcker redactó un informe secreto indicando que este elemento también podía usarse para producir una bomba, con la importante diferencia respecto al U235 de que puede separarse por medios químicos. Pero el Np239 se desintegra en cuestión de días, originando un nuevo elemento con $Z = 94$, conocido en la actualidad como plutonio Pu239. Fritz Houtermans, del grupo financiado por el Ministerio de Correos, informó sobre esa alternativa. Aunque el Pu239 es inestable, como su vida media es de unos 25 000 años, en principio no hay problemas mayores para separarlo y almacenarlo. Por esta razón el uso de reactores civiles puede tener siempre consecuencias militares. A finales de agosto de 1941 los científicos alemanes vieron «abrirse un camino que llevaba a la bomba atómica», en palabras retrospectivas de Heisenberg. Pero para seguir ese camino era necesario disponer de un reactor operativo, algo que no consiguieron. Poco después se produjo la visita a Copenhague, de la que se hablará en seguida.

En diciembre de 1941 hubo dos acontecimientos que alteraron los planes alemanes: la entrada en la guerra de Estados Unidos y el estancamiento del frente ruso. La estrategia alemana de una guerra relámpago había llegado a su fin, y los factores que decidirían la victoria eran los recursos y la mano de obra disponibles y la

capacidad industrial. Los responsables del proyecto alemán organizaron varias reuniones con diversas autoridades —entre diciembre de 1941 y junio de 1942— para tomar una decisión sobre la bomba. Heisenberg participó en todas ellas y siempre transmitió el mismo mensaje: la construcción de un arma era posible, pero en un plazo de varios años debido a las dificultades técnicas, fundamentalmente relacionadas con la necesidad de conseguir un reac-

ENERGÍA LIBERADA EN LA FISIÓN NUCLEAR

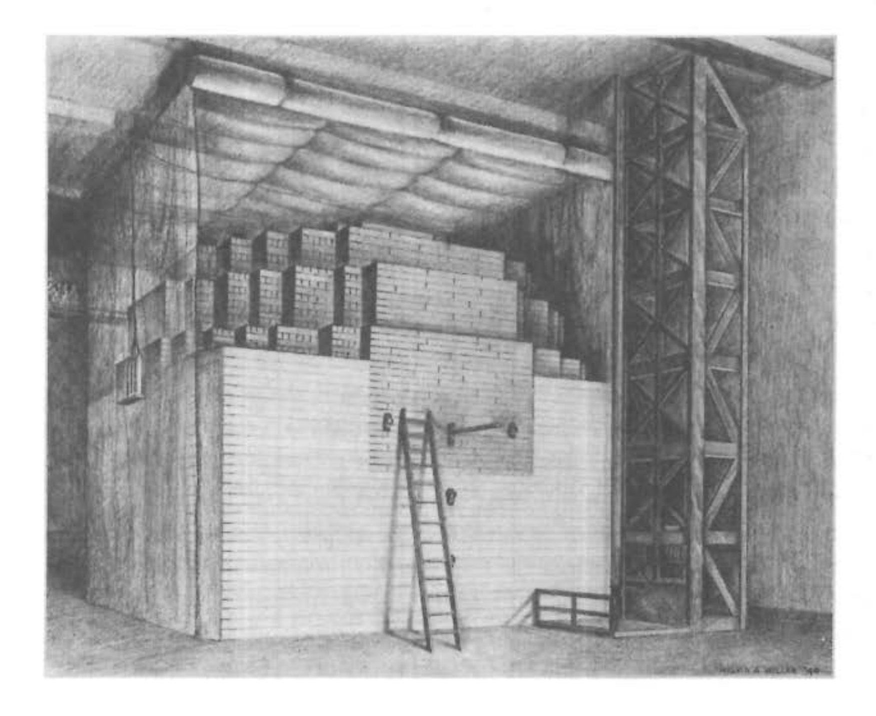
En una reacción química se producen intercambios entre los electrones menos ligados de los átomos o moléculas que entran en juego. Las energías típicas se miden en unidades de electrón-voltio (eV), que es la energía adquirida por un electrón en una diferencia de potencial de un voltio y equivale a $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ J. A efectos prácticos, estas energías se expresan en unidades de kJ/mol (kilojulio por mol). Recordemos que un mol contiene $6 \cdot 10^{23}$ átomos o moléculas (el número de Avogadro). Por ejemplo, en la combustión del metano se liberan unos 800 kJ/mol, que corresponden a unos 8 eV por molécula. Las energías típicas de los procesos nucleares se miden en MeV, es decir, millones de veces más grandes que las de los procesos químicos. Vamos a utilizar la famosa ecuación de Einstein $E=mc^2$, que expresa la equivalencia entre masa y energía, para calcular la energía liberada en un proceso concreto de fisión nuclear: U236 → Ba141 + Kr 92 + 3*n*. En unidades atómicas de masa (uma), la masa del núcleo inicial de U236 es de 236,0456 uma, mientras que la suma de las masas de los productos resultantes es

140,9144 (Ba141) + 91,9262 (Kr92) + 3 · 1,0087 (3 neutrones) = 235,8667 uma.

Con la diferencia de masas, 236,0456 - 235,8667 = 0,1789 uma, se obtiene la energía liberada en esta reacción. Para dar su valor en julios, hay que usar los valores 1 uma = $1{,}66 \cdot 10^{-27}$ kg, y $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. La energía liberada es, por tanto, de $2{,}7 \cdot 10^{-11}$ J. Este valor corresponde a una vía de fisión particular, y teniendo en cuenta todas las posibilidades de fisión, resulta un valor promedio de $3{,}2 \cdot 10^{-11}$ J, lo que equivale a 200 MeV. Una energía ínfima a escala macroscópica (la energía cinética de un caracol perezoso en movimiento es un millón de veces mayor), pero recordemos que se trata de un valor por cada núcleo de U236. Si multiplicamos por el número de Avogadro, resulta que la fisión de 236 gramos de U236 liberan una energía de unos $2 \cdot 10^{13}$ J. En comparación, en la explosión de una tonelada de TNT se liberan $4 \cdot 10^9$ J, unas 5000 veces menos.

LA PRIMERA REACCIÓN EN CADENA CONTROLADA

El primer reactor experimental fue construido bajo la dirección de Enrico Fermi en 1942, en los sótanos del campo de fútbol de la Universidad de Chicago. El dibujo es de Melvin A. Miller, uno de los participantes en el experimento. Consistía en una serie de bloques de uranio metálico y óxido de uranio apilados (de ahí que se le llamara también *pila atómica*) en una estructura cúbica embebida en grafito, que actuaba como moderador de los neutrones, todo ello protegido con ladrillos. Una fuente de neutrones situada en el centro de la pila iniciaba la fisión del uranio. Los neutrones producidos en la fisión se registraban mediante detectores estratégicamente distribuidos en la pila, que producían señales sonoras audibles en la mesa de control (no visible en el dibujo). La intensidad creciente de estas señales indicaba el inicio de una reacción en cadena automantenida. El ritmo de la reacción se controlaba al introducir cadmio, un fuerte absorbente de neutrones, a través de los orificios que se ven en la ilustración. Un manipulador se subía a la escalera de mano para desplazar unas barras de madera envueltas en láminas de cadmio.



tor operativo y con la separación del U235. En la última de esas reuniones, el ministro de Armamento Albert Speer llegó a la conclusión de que, en el mejor de los casos, antes de que acabara la guerra solo podría conseguir reactores para barcos y submarinos, así que decidió dar todo su apoyo a los proyectos de Von Braun sobre las bombas volantes. El programa nuclear tuvo la prioridad mínima, dedicado solamente al reactor. Aparte de las valoraciones técnicas y económicas, en esta decisión pesó mucho el convencimiento, compartido por científicos y militares, de que Alemania llevaba la delantera a los aliados en el terreno de las aplicaciones de la fisión nuclear. Por ello, suponían que la bomba atómica no sería relevante para decidir el final de la guerra.

«El científico se ha convertido a ojos del pueblo en el mago a quien obedecen las fuerzas de la naturaleza. Pero este poder solo puede llevar a algo bueno si a la vez es un sacerdote y si actúa solamente como ordena la divinidad o el destino.»

— Palabras de Heisenberg en un manuscrito de 1942, publicado en 1984 con el título «Ordnung der Wirklichkeit» (Orden de la realidad).

El diseño del reactor de Heisenberg, con capas alternadas de uranio y agua pesada, era poco efectivo. Diebner había logrado otro mucho mejor, con una ristra de cubos huecos de uranio metálico dentro del agua pesada. Al aumentar la superficie de contacto entre los cubos de uranio y el agua pesada, se pueden frenar los neutrones con más eficiencia, y, por tanto, la probabilidad de fisión es mayor. Pero la falta de coordinación entre los grupos y la obstinación de Heisenberg con su diseño retrasaron la adopción del prototipo de Diebner. Sin embargo, los bombardeos aliados obligaron a que los laboratorios del proyecto nuclear se trasladaran al sur de Alemania. Los experimentos prosiguieron hasta prácticamente los últimos días de la guerra y puede sorprender ese empeño en seguir trabajando hasta el final de una guerra que ya se sabía perdida. La razón hay que buscarla en que los físicos alemanes estaban convencidos de su superioridad frente a los aliados en lo referente a fisión nuclear, por lo que

creían que con un reactor en marcha podrían negociar mejor su futuro en la posguerra. Naturalmente, no sabían que, a finales de 1942, Fermi ya había conseguido en Chicago la primera reacción en cadena controlada.

LA VISITA A COPENHAGUE

Alemania había creado en los países ocupados una red de Institutos Alemanes de Cultura, como un instrumento de propaganda del régimen. Dependían del padre de Weizsäcker, que fue secretario de Estado de Asuntos Exteriores entre 1938 y 1943. A principios del verano de 1941, Weizsäcker hijo visitó Copenhague para preparar una serie de conferencias en el Instituto Alemán. Bohr no quiso participar en esta maniobra de propaganda, y sintió como una afrenta que Weizsäcker irrumpiera en su despacho, acompañado por el director del Instituto de Cultura alemán, para pedirle su colaboración.

El 15 de septiembre de 1941, cuando el poder nazi en Europa estaba en pleno apogeo, Heisenberg llegó a Copenhague para participar en esas conferencias. No se daba cuenta de que, a pesar de las buenas intenciones que pudiera albergar, él representaba a la potencia ocupante para los daneses, incluso para sus amigos; los físicos daneses no acudieron a las conferencias. Margrethe, la esposa de Bohr, siempre vio en aquella visita un acto hostil y no hay duda de que también era la opinión de Bohr, a pesar de la amistad y el afecto que sintiera por Heisenberg. Durante los pocos días que permaneció en Copenhague, Heisenberg habló con Bohr varias veces en público y una sola en privado. Como temían la vigilancia de la Gestapo, la conversación privada con Bohr tuvo lugar durante un paseo por un parque cercano al instituto, tal como hacían en los años anteriores. Por tanto, no hay ningún testigo de su conversación y aunque las versiones de ambos participantes han variado con el tiempo, siempre han sido divergentes. De lo que no hay duda, por el testimonio de sus familiares y colaboradores, es de que Bohr volvió encolerizado con-

LA MATRIZ S

Entre 1942 y 1945, Heisenberg elaboró las bases de lo que después se llamó *teoría de la matriz S*, para estudiar colisiones entre partículas elementales. En los cálculos basados en la teoría cuántica de campos aparecían cantidades infinitas, que impedían cualquier aplicación práctica. Heisenberg sugirió una manera de describir los fenómenos que pudieran ser observados en el laboratorio sin pasar por los cálculos detallados. Su idea tiene algo en común con lo que hizo al desarrollar la mecánica cuántica. En el caso de los átomos, las cantidades observables son las frecuencias de los estados estacionarios, y Heisenberg construyó una matriz que definía dichos cambios en las transiciones atómicas. Ahora, en el caso de dos partículas que colisionan, se pueden observar sus momentos mucho antes y mucho después de la colisión, cuando las partículas están lejos de la región en la que interaccionan. La «matriz S» describe los cambios de estas cantidades debido a la colisión. Durante una visita a Holanda, pudo hablar de esto con Kramers, quien le dio una idea excelente. Los elementos de la matriz S no pueden determinarse sin una teoría completa, pero desde el punto de vista matemático su estructura corresponde a una función analítica en el plano complejo de las variables de los momentos.



Hendrik Anthony «Hans» Kramers en Ann Arbor, Michigan, hacia 1928.

Caída en el olvido

Heisenberg encontró así un resultado importante: los valores de las variables que anulan los elementos de la matriz están relacionados con los estados estacionarios de las partículas elementales, y propuso de forma insistente a Kramers escribir juntos un artículo sobre estos resultados, algo que este siempre rechazó cortésmente. Heisenberg nunca fue consciente de que representaba a la potencia ocupante en los países que visitaba, y que un artículo conjunto convertía a Kramers en colaboracionista a ojos de sus compatriotas. La teoría de la matriz S languideció durante algunos años, hasta que resurgió en la década de 1960 como una teoría fenomenológica para estudiar, a falta de una teoría cuántica de campos, las colisiones de partículas elementales a altas energías.

tra Heisenberg, nunca le perdonó esta visita y, aunque después de la guerra siguieron manteniendo relaciones de amistad, estas ya no fueron como antes.

«En septiembre de 1941 vimos abrirse ante nosotros un camino que llevaba a la bomba atómica.»

— Heisenberg, en una entrevista con D. Irving, 1965.

Bohr y Heisenberg hablaron algunas veces sobre esa visita en los primeros años de la posguerra, pero no trascendió nada de ello. La polémica se hizo pública cuando en 1956 apareció un libro de R. Jungk acerca de la bomba atómica, en el que los físicos alemanes aparecían casi como resistentes al nazismo, en una versión que al parecer estuvo muy influida por Weizsäcker. En su libro, Jungk viene a decir que Heisenberg estaba haciendo todo lo posible para que Hitler no tuviera la bomba y pretendía transmitir el mensaje a los aliados a través de Bohr, pero este le malinterpretó. Heisenberg escribió a Jungk una carta para matizar lo referente a su conversación con Bohr que sugiere que, efectivamente, todo acabó en un malentendido por parte de Bohr debido a los sobreentendidos con que se expresó en aquella conversación por temor a ser escuchados. Heisenberg preguntó a Bohr si creía que en tiempos de guerra era correcto que los físicos se dedicaran al uranio. A su vez, Bohr le preguntó si era posible utilizar la energía atómica durante la guerra. Heisenberg respondió que sí, y que él sabía cómo hacerlo. Bohr entendió que el programa nuclear alemán estaba muy avanzado. En ese punto, Heisenberg sugirió que los físicos de ambos bandos podrían ponerse de acuerdo para no construir bombas nucleares. Y, como explica a Jungk, dado que la situación de la física en Alemania se había degradado desde 1933, mientras que se había desarrollado enormemente en Estados Unidos, su propuesta podía considerarse como un intento de favorecer a Hitler. En sus propias palabras: «No sé, por supuesto, cuánto pudo influir esto en Bohr».

Estos son los puntos más relevantes de la carta de Heisenberg, y conviene hacer dos comentarios. En primer lugar, es sorprendente que tuviera que viajar a Copenhague para debatir con

Bohr sobre un dilema ético, que siempre había consultado con Planck o con Laue, máxime cuando se trataba de algo referente a un secreto militar. El segundo punto es que en la carta se hace referencia a una información sobre el esfuerzo técnico de Estados Unidos —que aún no había entrado en guerra—, que solo conoció después de la guerra. Hasta 1945, los científicos alemanes estaban convencidos de su enorme avance sobre los aliados en las cuestiones de la fisión nuclear. Bohr se enfadó muchísimo cuando leyó el libro de Jungk. Escribió varios borradores de carta a Heisenberg pero, no se sabe por qué, no llegó a mandarle ninguna. Estos escritos se hicieron públicos en 2002, y haremos un resumen de la versión de Bohr según uno de sus últimos borradores. Después de recordarle las conversaciones que ya habían tenido años atrás, reconoce las intenciones de Heisenberg de ver cómo le iba y de ayudarle en lo que pudiera. Le reprocha que no entendiera lo difícil que resultaba para los daneses reunirse en aquel período con él y con Weizsäcker, que estaban tan convencidos de la victoria alemana. Heisenberg también le dijo desde el primer momento que si la guerra duraba lo suficiente, se decidiría mediante armas atómicas, a lo que él se había estado dedicando. Además, después de esa conversación, los colegas en el instituto le contaron que, según Weizsäcker, la ciencia alemana estaría en muy buena posición después de una victoria que tanto debería a Heisenberg.

Dejando de lado algunos detalles, este es el resumen de las versiones de los protagonistas de la misteriosa visita. Es evidente que, a menos que salgan a la luz escritos insospechados, solo de manera indirecta se podrá aclarar su veracidad. Las conversaciones registradas durante la detención de Heisenberg y otros científicos al final de la guerra aclaran algunos puntos sobre su versión de la visita.

FARM HALL

En septiembre de 1943, Estados Unidos organizó la Misión Alsos, una operación de información sobre el proyecto nuclear alemán. Al frente de la parte científica estaba S. Goudsmith, de quien se ha

hablado anteriormente a propósito del espín del electrón. La misión seguía el avance de las tropas aliadas en Europa y requisaba material u ordenaba la detención de científicos e ingenieros —los otros aliados tenían comandos semejantes para procurarse este tipo de botín de guerra—. En noviembre de 1944, tras examinar los archivos y papeles de Weizsäcker en Estrasburgo, Goudsmith se convenció de que los alemanes no habían construido la bomba atómica y ni siquiera habían conseguido una reacción en cadena controlada. Cuando Heisenberg fue detenido en mayo de 1945, ofreció a los aliados sus conocimientos sobre la fisión nuclear, pero, para su sorpresa, Goudsmith no dio importancia a la oferta.

Los británicos se hicieron cargo de diez científicos alemanes: Gerlach, Diebner, Hartek, Bagge, Wirtz, Korsching, Heisenberg, Weizsäcker, Hahn y Laue. En esa lista no estaban todos los científicos implicados en el programa nuclear —algunos habían sido detenidos por los soviéticos— y los dos últimos no tuvieron intervención directa. A primeros de julio fueron conducidos a Farm Hall, una mansión cercana a Cambridge, donde permanecieron prácticamente incomunicados hasta finales de 1945. Los detenidos ignoraban si había micrófonos ocultos en la casa. Sus conversaciones eran escuchadas y se grababa todo aquello que tuviera relación con el programa nuclear. La transcripción de las conversaciones fue editada y comentada en 1996 por Jeremy Bernstein. Sus comentarios son muy críticos: Heisenberg ignoraba muchas cuestiones esenciales, tanto de reactores nucleares como de bombas atómicas, y los conocimientos de sus colegas sobre los principios básicos eran peores. Su lectura permite tener una idea de la actitud de estos científicos ante el régimen nazi y ante el programa nuclear alemán.

A este respecto son interesantes las grabaciones efectuadas los días 6 y 7 de agosto de 1945, cuando los detenidos oyeron por la radio que Estados Unidos había lanzado una bomba atómica sobre Japón. Su primera reacción fue pensar que era una noticia falsa, pues estaban convencidos de ir muy por delante de los aliados en esa materia. Pero tuvieron que aceptar que se habían sobreestimado a sí mismos y subestimado a los aliados. Hahn les dijo varias veces que eran unos fracasados por no haberlo conseguido antes que los aliados. Nadie le respondió, lo que implícitamente es un reconoci-



FOTO SUPERIOR:
El reactor nuclear experimental alemán situado en Haigerloch (abril de 1945), sometido a una revisión de la Misión Alsos.

FOTO INFERIOR:
Miembros de la Misión Alsos revisando documentos incautados a los científicos alemanes.



miento de que la bomba había sido uno de sus objetivos, en un momento u otro. Cuando trataron de explicarse lo que habían hecho los aliados, salieron a la luz algunos de los escollos con los que se encontraron, como la rivalidad y la falta de coordinación entre ellos.

La noticia supuso un golpe en su estima personal, sobre todo cuando leían en la prensa británica comentarios despectivos sobre los científicos alemanes. Se encontraron ante un dilema. De cara a sus compatriotas no podían reconocer que eran unos ineptos, como les acusaba Hahn, ni unos traidores que habían saboteado el programa nuclear, como temían Gerlach y otros. Pero tampoco era el momento de declarar ante los aliados que se habían dedicado a construir una bomba atómica. Fraguaron una versión, naturalmente favorable, que es la que defendieron en años sucesivos. Weizsäcker la inició: «La historia recordará que los americanos y los ingleses hicieron una bomba y que al mismo tiempo los alemanes, bajo el régimen de Hitler, produjeron una máquina operativa». Lo último es falso, pues no llegaron a construir un reactor operativo; además, Weizsäcker ignora que en sus informes secretos de 1940 se refería explícitamente a la construcción de una bomba. No deja de sorprender que los escrúpulos morales aparecieran por primera vez en Farm Hall. Nunca antes se habían referido a ello, pero en los años sucesivos empezaron a recordar las múltiples conversaciones en las que habían tratado de las implicaciones éticas. Unos días después, los británicos les pasaron un documento oficial con algunos detalles acerca de las bombas estadounidenses. Se dieron cuenta de que la parte física era más sencilla de lo que pensaban. Todo suponía un gran esfuerzo industrial, que Alemania no podía haber hecho, consideración que se presentó más tarde como otro argumento moral, en el sentido de que los científicos alemanes no podían pedir un sacrificio semejante a su país. También vieron que los aliados habían utilizado grafito como moderador, y Bothe se convirtió en chivo expiatorio; como tampoco sabían si los aliados habían construido un reactor, intentaron presentar como un triunfo lo que habían hecho hasta entonces con sus prototipos.

Los detenidos escribieron un memorándum para dar su versión, y se aprobó, después de muchas discusiones en las que algunos expresaron sus temores de que no se hubieran destruido todas

las notas relacionadas con el proyecto, algo que invita a tomarlo con reservas. Esta es una de las ironías de Farm Hall: los implicados pudieron ponerse de acuerdo acerca de la versión de los hechos que más les convenía, con algunas verdades, medias verdades, algunas falsedades y oportunas omisiones. Laue, aunque firmó el memorándum, tenía una actitud lúcida. En 1959 le contó a un amigo lo sucedido en aquellos días y escribió lo siguiente:

> Más tarde, durante la sobremesa, se desarrolló la versión de que los físicos atómicos alemanes en realidad no querían la bomba atómica, bien porque era imposible construirla durante la duración esperada de la guerra o simplemente porque no la querían hacer de ninguna manera. La iniciativa en estas discusiones la llevaba Weizsäcker; yo no oí mención alguna a cualquier punto de vista ético. Heisenberg se mantuvo prácticamente en silencio.

La versión que se desarrolló con variaciones a partir de ese memorándum es que Heisenberg y Weizsäcker se esforzaron desde el primer momento por mantener el control del proyecto y dirigir las investigaciones hacia un reactor nuclear, lo que les atribuía más influencia de la que realmente tenían. Mientras el proyecto estaba controlado por los militares, poco podían hacer ellos, además de que había otros grupos implicados con los que apenas tenían contacto. Una vez que el ministro de Armamento renunció a la construcción de la bomba, sus investigaciones se dedicaron, en efecto, a construir un reactor. Pero ellos no influyeron en esta decisión, se limitaron a explicar las dificultades técnicas y el plazo estimado para conseguir una bomba atómica. Sin embargo, este argumento fue recogido en el libro de Jungk, mencionado antes, y este asunto se convirtió en un tema de investigación muy comentado.

LOS OTROS PROYECTOS NUCLEARES

Aunque Estados Unidos se declaró país neutral en septiembre de 1939, mantuvo con Gran Bretaña un intercambio de información

sobre investigación para usos militares, como el radar y la fisión nuclear. En junio de 1942 se inició el llamado *Proyecto Manhattan*, dirigido por el general Groves, para construir la bomba atómica.

«Uno espera que pueda hacerse a tiempo; a tiempo significa hacerse antes de que lo haga el otro bando.»

— Richard Feynman, uno de los participantes en el Proyecto Manhattan, sobre la construcción de la bomba atómica.

Curiosamente, en el mismo momento, los alemanes decidieron limitar su programa nuclear, pues estaban convencidos de que ninguno de los contendientes podría construir la bomba antes del final de la guerra. Groves impuso desde el primer momento una organización jerárquica y estableció una lista de prioridades. En diciembre de 1942 Fermi consiguió la primera reacción en cadena controlada. En el verano de 1943 se inició la construcción de las bombas atómicas en la base secreta de Los Álamos, bajo la dirección científica de Robert Oppenheimer, y dos años después se llevó a cabo la explosión de la primera bomba atómica experimental. El 6 de agosto se lanzó una bomba de U235 sobre Hiroshima, y tres días después se lanzó una bomba de Pu239 sobre Nagasaki.

En agosto de 1940, en la Unión Soviética se creó una comisión para estudiar las posibilidades militares de la fisión. El equivalente al Proyecto Manhattan se inició en la primavera de 1943 con el nombre de Laboratorio n.° 2, dirigido por el físico Igor Kurchatov. Los soviéticos tenían un grave problema con la falta de suministros, pero la ventaja de estar informados acerca del programa estadounidense, gracias entre otros al espía Fuchs, que les informaba desde Los Álamos. Pero hasta mediados de 1949 no consiguieron su primera bomba atómica.

Japón también tuvo su proyecto nuclear, iniciado en abril de 1941, bajo la dirección científica de Yoshio Nishina, considerado el padre de la física moderna en el país nipón. Ese proyecto tenía bastantes cosas en común con el proyecto alemán, como la falta de coordinación efectiva —la marina japonesa impulsó durante algún tiempo su propio proyecto independiente— y el hecho de

que el ejército no le diera prioridad máxima, pues los militares japoneses estaban también convencidos de que su victoria sería rápida y brutal. La existencia de este proyecto fue silenciada durante la posguerra, en la que Japón apareció como el país víctima de la bomba atómica. Pero no cabe duda de que tanto los militares alemanes como los japoneses habrían utilizado la bomba si la hubieran construido a tiempo.

La guerra fue, naturalmente, el motivo principal que llevó a los científicos a participar en sus respectivos proyectos nucleares, aunque no se puede excluir que algunos de ellos tuvieran también otros motivos, como obtener una promoción personal o hacer frente a un reto científico o técnico. Por lo que se refiere a Heisenberg, se muestra la siguiente cita, extraída de una semblanza biográfica escrita por los británicos Nevill Mott y Rudolf Peierls; este último fue estudiante de Heisenberg y participó en el Programa Manhattan:

> [...] Es razonable suponer que quería que Alemania ganara la guerra. Desaprobaba muchos aspectos del régimen nazi, pero era un patriota. Desear la derrota de su país habría requerido una dosis de rebeldía mucho mayor de la que tenía. Sin embargo, incluso si hubiera querido rechazar toda cooperación, esto no habría resultado tan sencillo en un régimen que no toleraba la objeción de conciencia tan fácilmente como Gran Bretaña y Estados Unidos. Numerosos ciudadanos de muchos países en guerra participaron en el esfuerzo bélico cuando fueron requeridos, y los pocos que no lo hicieron necesitaron un coraje y una fuerza de convicción excepcionales.

Después de la guerra, Heisenberg mencionó en varias ocasiones que «las circunstancias exteriores les evitaron la difícil decisión de determinar si debían o no construir bombas atómicas». Es decir, la decisión de Speer evitó a los científicos alemanes la posibilidad de plantearse un dilema ético.

Los aliados tenían el argumento ético de oponerse al régimen nazi, cuyas atrocidades no acabaron de conocerse hasta después de la guerra; los científicos aliados estaban convencidos de que Alemania ya se había lanzado a la construcción de la bomba ató-

mica. Además, la valía científica de Heisenberg les hacía pensar que el proyecto alemán estaba muy avanzado. Esta es una ironía de la historia: tanto los alemanes como los aliados estaban convencidos de que Alemania estaba más avanzada que los aliados. Estos incluso hicieron planes para raptar a Heisenberg o asesinarlo, con el fin de frenar el avance alemán.

Tras el lanzamiento de las bombas atómicas sobre Japón, la reacción general de los participantes en el Proyecto Manhattan fue de satisfacción, tanto por el éxito de sus trabajos como por el fin de la guerra. Al parecer, cuando Alemania capituló, en mayo de 1945, pocos recordaron las causas que motivaron su participación en el proyecto. Una digna excepción a este olvido fue la de Joseph Rotblat, quien a finales de 1944, cuando ya era evidente que la guerra contra Alemania estaba ganada, decidió abandonar Los Álamos. Esta actitud fue considerada sospechosa por los militares, y Rotblatt tuvo algunas dificultades para reincorporarse a su puesto en la Universidad de Liverpool. Rotblat fue uno de los animadores del movimiento Pugwash, que implicó a científicos de todos los países en el control y la limitación de armas nucleares, y recibió en 1995 el premio Nobel de la Paz. Otra excepción fueron siete científicos de Chicago que trabajaban para el Proyecto Manhattan, entre los que se encontraban Franck James y Leo Szilard. Un mes antes del primer ensayo nuclear escribieron un informe en el que recordaban el motivo principal por el que todos los científicos trabajaban en el proyecto. Como Alemania ya se había rendido, proponían que antes de lanzar una bomba atómica sobre algún país, se llevara a cabo una explosión atómica en un lugar desierto, ante representantes de diversos países. Sin duda, estos científicos no eran conscientes de que la Guerra Fría ya había empezado y que el armamento nuclear tenía objetivos que iban más allá de acabar la guerra en el Pacífico.

CAPÍTULO 6

Hombre público, hombre privado

Al finalizar la guerra, Heisenberg se implicó activamente en la recuperación y normalización de la ciencia alemana. Sus contribuciones a la física, aunque destacadas, no alcanzaron la altura de las que había realizado en el pasado. Hasta mediados de la década de 1950 dedicó casi todas sus energías a actividades relacionadas con la política científica. También escribió notas históricas para justificar su actividad en la guerra, así como libros y artículos sobre ciencia, filosofía y memorias.

Los detenidos de Farm Hall regresaron en enero de 1946 a una Alemania dividida en cuatro zonas de ocupación y que afrontaba problemas de posguerra como escasez de alimentos y combustible, viviendas e infraestructuras destruidas o falta de suministro de electricidad y agua. En 1949, las zonas estadounidense, británica y francesa formaron la República Federal Alemana y la zona soviética se convirtió en la República Democrática Alemana. Heisenberg tenía cuarenta y cuatro años cuando volvió a Alemania y de nuevo rechazó las ofertas que le llegaban de diversas universidades de Estados Unidos o de Gran Bretaña. Sobre dicho tema, al poco de llegar a Alemania escribió a su mujer:

> Soy consciente de que América será el centro de la vida científica durante las próximas décadas, y que las condiciones para mi trabajo serán mucho peores en Alemania que allá... Por mi parte, quiero intentar ayudar a la reconstrucción aquí durante los próximos años, y si la discordia entre políticos no interfiere mucho, será posible despertar algo de la activa vida intelectual de los años veinte...

Es decir, de nuevo se manifestaba el intenso sentido del deber que en los años anteriores le llevó a quedarse en Alemania a pesar del régimen político. Heisenberg dedicó el resto de su vida sobre todo a impulsar la ciencia en Alemania, en la que desempeñó un

papel importante para su recuperación. Escribió artículos y libros sobre ciencia, filosofía, memorias y notas históricas; también viajó y dio muchas conferencias sobre esos temas, entre las que cabe destacar el ciclo de conferencias dadas en la Universidad de St. Andrews, Escocia, en el invierno de 1955-1956, acerca de las consecuencias filosóficas de la física moderna. Dichas conferencias dieron origen a un libro, *Física y filosofía*, que, por su interés, sigue editándose en la actualidad. Su investigación en física, sin embargo, fue disminuyendo en intensidad.

HOMBRE PÚBLICO

Los británicos eran decididos partidarios de favorecer una pronta recuperación de Alemania. Gotinga, con su tradición universitaria e investigadora, les pareció que podría ser el lugar ideal para relanzar la ciencia alemana. Además de su universidad, contaba en aquel momento con unos treinta institutos de la Sociedad Káiser Wilhelm, que desde 1911 articulaba la investigación en Alemania. Ese organismo se refundó en la actual Sociedad Max Planck, una red de institutos de investigación que ofrece a destacados científicos, de cualquier campo y de cualquier país, los medios para desarrollar la investigación de primera línea que estimen oportuna. Heisenberg se instaló en Gotinga como director del Instituto Max Planck de Física y Astrofísica hasta que en 1958 se trasladó a Múnich para ampliar el instituto en esa ciudad.

En 1951 se constituyó la Fundación Alemana para la Investigación para financiar la investigación y establecer relaciones con la tecnología, las industrias y las universidades y escuelas técnicas. Heisenberg fue elegido miembro de la junta directiva y presidente de su comisión de investigación nuclear. Este campo de investigación estaba bastante limitado, pues los aliados habían prohibido la construcción de ciclotrones y la investigación en física nuclear aplicada, en isótopos radiactivos e incluso en física experimental de partículas elementales. Heisenberg opinaba que la tecnología de reactores nucleares y de aceleradores podría im-

pulsar la física en Alemania, lo que a su vez podría ser un motor de progreso de toda la economía. Convenció de ello al canciller Adenauer, de quien fue asesor para asuntos científicos durante algunos años. Dicha prohibición fue relajada hasta su completa derogación en 1954, y dos años más tarde se creó la Comisión de Energía Nuclear.

«En toda ciencia de la naturaleza que incluya también a los seres vivos, la conciencia debe tener su lugar, porque también pertenece a la realidad.»

— Reflexión de Heisenberg en *Diálogos sobre la física atómica*.

A partir de 1951 presidió la delegación alemana para la creación de un laboratorio europeo de física nuclear, el actual CERN (acrónimo en francés de Consejo Europeo para la Investigación Nuclear). Este organismo está situado en Ginebra, Suiza, y es la mayor instalación de aceleradores para la física de partículas elementales. Heisenberg rechazó la oferta de asumir la dirección del CERN porque creía que aún tenía mucho trabajo que hacer en Alemania. La participación en la política científica de Alemania era su manera de servir a su país, y estaba convencido de que era la persona más adecuada para hacerlo, siguiendo el modelo de Planck después de la Primera Guerra Mundial.

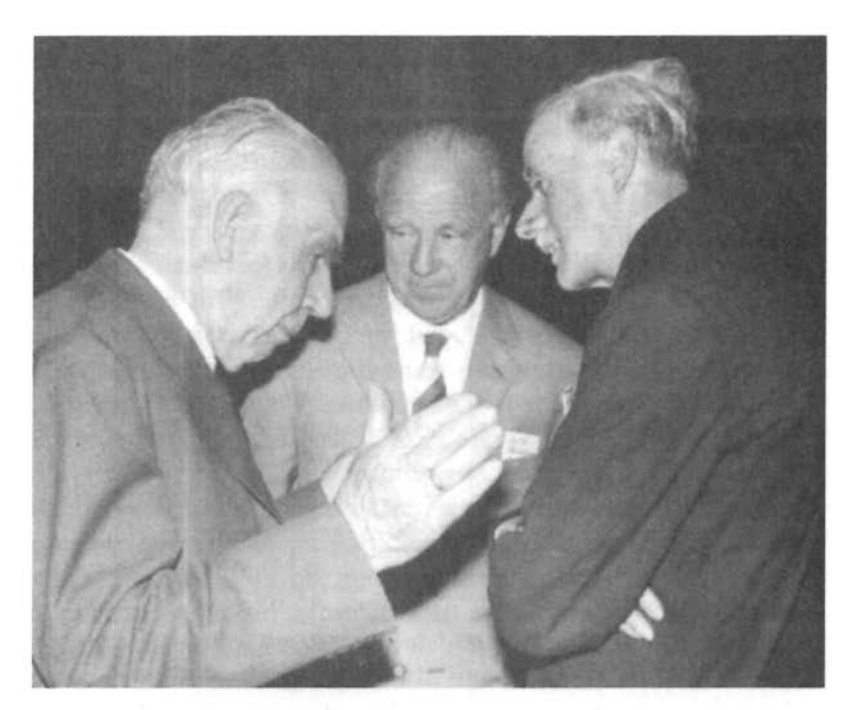
Hubo una tarea que le fue particularmente grata, y a la que se dedicó hasta pocos meses antes de su muerte. El gobierno alemán lo nombró presidente de la Fundación Alexander von Humboldt, creada en 1953. El propósito de esta fundación es becar a jóvenes científicos extranjeros para que realicen estancias posdoctorales en centros alemanes, con el fin de impulsar la investigación y ayudar a establecer relaciones científicas con otros países. Desde sus estancias en Copenhague durante la década de 1920, Heisenberg estaba convencido de la importancia de reunir a jóvenes de diversos países, culturas o creencias para estudiar y trabajar sobre el mismo problema. La ciencia puede ser un medio para llegar al entendimiento entre las naciones, y la Fundación Von Humboldt

era su manera de contribuir a ese ideal, compartido por una gran familia internacional de científicos.

Acabaremos este resumen de actividades de Heisenberg con una discrepancia con Adenauer que salió a la luz pública. Este último apoyaba los planes de la OTAN para equipar al ejército alemán con armas nucleares tácticas. En 1957 apareció el llamado *Manifiesto de Gotinga*, firmado por un grupo de dieciocho físicos nucleares, entre los que se encontraban seis antiguos huéspedes de Farm Hall: Gerlach, Hahn, Heisenberg, Laue, Weizsäcker y Wirtz. En el manifiesto se decía que tras el tecnicismo «arma táctica» se ocultaba una bomba atómica capaz de destruir una ciudad pequeña, y se defendía que Alemania estaría más segura sin ningún tipo de arma nuclear. Esto tuvo un gran eco, y días después varios ministros mantuvieron una larga reunión con algunos de los firmantes para tratar este asunto, aunque Heisenberg no acudió por un problema de salud. Finalmente, el Gobierno alemán decidió que el ejército no dispondría de armamento nuclear. Aunque esta decisión no excluyó el despliegue de armas nucleares tácticas estadounidenses, transportadas en vehículos del ejército alemán, el manifiesto constituyó un factor importante para que la opinión pública alemana se decantara en contra de las armas nucleares.

EL GRIAL DE LA TEORÍA UNIFICADA

La intensa actividad desplegada por Heisenberg en asuntos de política científica no le dejó el tiempo que hubiera deseado para la investigación en física. Por otra parte, tampoco podía pretender mantener el mismo nivel de creatividad que tuvo en las décadas de 1920 y 1930. A continuación, se hace referencia a solo dos de los temas en los que trabajó. Durante su detención en Farm Hall tuvo ocasión de hablar con Weizsäcker sobre cuestiones de astrofísica. Ello le llevó a estudiar las propiedades de masas turbulentas de gases calientes en rotación, que son las condiciones iniciales de la formación de galaxias, estrellas y planetas. Recordemos que



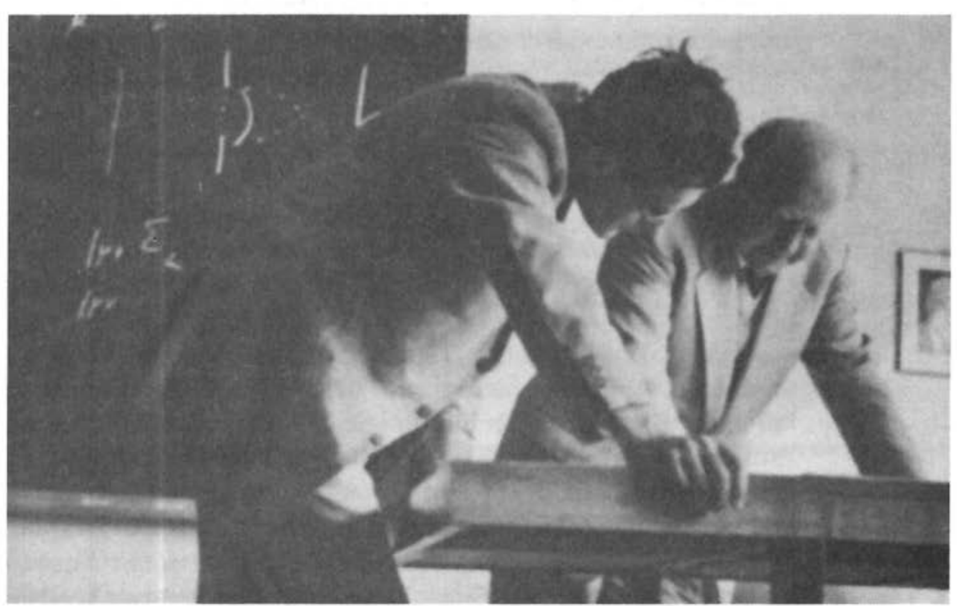


FOTO SUPERIOR:
En Lindau, ciudad alemana situada en el lago Constanza, se celebran desde 1951 encuentros informales entre científicos galardonados con el premio Nobel y jóvenes promesas de todas partes del mundo. La imagen corresponde al de 1962, que contó con la participación de Bohr, Heisenberg y Dirac (de izquierda a derecha).

FOTO INFERIOR:
Heisenberg junto a Hans-Peter Dürr, trabajando en la teoría de campos unificada.

su tesis doctoral estuvo dedicada precisamente a un estudio de las turbulencias, así que el problema no le era desconocido. En 1948 publicó un artículo sobre una teoría estadística de las turbulencias que puede parecer un trabajo menor, pero solo si se compara con sus otras grandes aportaciones. Lo cierto es que dicho artículo sigue siendo muy citado por los especialistas actuales.

No obstante, Heisenberg dedicó sus mayores esfuerzos a la búsqueda de una teoría de campos unificada. Einstein también empleó los últimos años de su vida en intentar construir una teoría unificada de los campos electromagnético y gravitatorio. En ambos casos el resultado fue infructuoso. ¿Por qué ese interés por la unificación? A menudo, al relacionar fenómenos aparentemente distintos se obtienen avances científicos significativos. Por ejemplo, fenómenos que suceden en la Tierra, como la caída de los objetos, y otros que suceden en el cosmos, como el movimiento de los planetas del sistema solar, tienen una misma causa: la gravitación. Esta es la moraleja de la historia, probablemente apócrifa, de la manzana de Newton, de quien podemos decir que logró la primera teoría unificada. En el siglo XIX se comprendió que los fenómenos de la electricidad y del magnetismo eran dos caras de una misma moneda: el campo electromagnético. Las ecuaciones de Maxwell representan la unificación de estos fenómenos, y las ondas electromagnéticas predichas por esas ecuaciones fueron descubiertas a finales de dicho siglo. Casi inmediatamente, llegaron las comunicaciones por radio.

Desde el punto de vista conceptual es importante explicar el mayor número de fenómenos con el menor número de hipótesis, y esta es la razón de la búsqueda de teorías unificadas, aunque no hay nada que establezca que necesariamente tengan que existir. Einstein intentó unificar su teoría general de la gravitación y el electromagnetismo, pero no lo consiguió, como tampoco ninguno de los físicos que lo intentaron después. En este contexto, al hablar de campo nos referimos a una función que describe cierta propiedad —como la intensidad de la gravitación— en cualquier punto del espacio y en cualquier instante de tiempo. De manera muy simplificada, podemos decir que la unificación que buscaba Einstein consistía en encontrar la ecua-

LAS INTERACCIONES FUNDAMENTALES

Existen cuatro tipos distintos de interacciones fundamentales: electromagnética, gravitatoria, nuclear débil y nuclear fuerte. Mientras que las dos primeras se manifiestan a cualquier distancia entre los cuerpos o partículas que interaccionan, las interacciones fuerte y débil solo actúan a escala microscópica, cuando las distancias entre las partículas son comparables o inferiores al tamaño del núcleo.

1. La *interacción electromagnética* fue la primera en ser descrita con una teoría cuántica de campos, es decir, una teoría a la vez cuántica y relativista. En la década de 1940 se construyó la electrodinámica cuántica, en la que la interacción entre dos partículas es el resultado del intercambio de fotones. Unos veinte años más tarde le llegó el turno a la *interacción débil*, en forma de una descripción unificada con la electromagnética, y desde entonces se habla en este contexto de interacción electrodébil. Esta unificación postuló la existencia de tres nuevos agentes de intercambio: las partículas W^+, W^- y Z^0. Su descubrimiento en la década de 1980 confirmó la teoría electrodébil.

2. La teoría cuántica de campos correspondiente a la *interacción fuerte* se llama cromodinámica cuántica, y ha sido ampliamente confirmada por los experimentos desde los años 1970. Las partículas sensibles a esta interacción son los quarks y las formadas por quarks —como los protones y los neutrones—, que intercambian entre sí otras partículas llamadas gluones. Existen varios intentos de unificar la cromodinámica cuántica y la teoría electrodébil (como las teorías de gran unificación y las teorías supersimétricas), pero debido a las colosales energías que hay que poner en juego, ninguno de esos intentos ha podido ser verificado en los experimentos.

3. La *interacción gravitatoria* es la menos intensa de todas ellas, y por eso se ignora en la descripción de las partículas elementales. Sin embargo, es la más ubicua y persistente, pues siempre es atractiva y se manifiesta a cualquier distancia. Por ese motivo adquiere una importancia capital a escala cosmológica, aunque hasta el momento no se ha logrado una teoría cuántica satisfactoria para la gravitación. El intento más prometedor está dado por las teorías de supercuerdas, pero se está muy lejos de definirlas sin ambigüedad.

ción satisfecha por una única función —un único campo— que describa la gravitación y el electromagnetismo como aspectos de una misma entidad.

En la década de 1950 Heisenberg emprendió su propio intento de unificar las interacciones entre partículas elementales. Excluyó la gravitación, porque su intensidad entre partículas elementales es comparativamente despreciable respecto a las otras tres interacciones conocidas. Además de la electromagnética existe la interacción fuerte —que es el «pegamento» que mantiene unidos a protones y neutrones para formar los núcleos— y la interacción débil —que es responsable de la desintegración beta—. Heisenberg encontró una motivación especial para este intento en la reciente observación de chaparrones cósmicos, que él había defendido años atrás. En estos procesos múltiples se producen una gran cantidad de partículas elementales de diversos tipos, que involucran a las tres interacciones mencionadas.

El científico alemán se basó en consideraciones generales de simetrías en una teoría cuántica y relativista, para intentar sintetizar las tres interacciones en un único campo. Embarcó a Pauli en esta búsqueda, pero solo durante un par de años, porque su interés inicial dejó paso a un creciente escepticismo que lo llevó a dejar el proyecto. Poco tiempo después, Heisenberg también abandonó, a su pesar, una teoría aún incompleta, que no fue nunca considerada seriamente por la mayoría de físicos. Sabemos que entonces se desconocían muchas propiedades de las partículas elementales que a la postre han resultado fundamentales para este propósito.

HOMBRE PRIVADO

De todo lo expuesto en este libro, se aprecia que, en gran medida, la biografía de Heisenberg se confunde con la historia de la mecánica cuántica y sus aplicaciones. De manera tenaz, dedicó casi toda su vida a desarrollar la física y a apoyar la ciencia alemana, y hasta finales de la década de 1930 su tiempo libre lo dedicaba a la música y a las salidas con sus exploradores. Para no dar una imagen demasiado distorsionada de Heisenberg, cabe citar, aunque sea brevemente, algunos aspectos de su vida privada.

A finales de enero de 1937 conoció a Elisabeth Schumacher en una velada musical. Según contaron después muchas veces a sus hijos, el «flechazo» se produjo después de que Heisenberg interpretara el *Trío para piano en Sol mayor* de Beethoven. Su posterior conversación, iniciada por su común apreciación del movimiento lento de este trío, fue el desencadenante del idilio.

> «Esa velada cambió decisivamente nuestras vidas. Ambos sentimos que habíamos encontrado nuestro destino.»
>
> — Elisabeth Schumacher acerca del primer encuentro con Heisenberg.

Diez días después llegó el compromiso matrimonial, y tres meses más tarde ya estaban casados. Tuvieron siete hijos, tres chicos y cuatro chicas. Los recuerdos que los hijos mayores evocan de su progenitor empiezan a partir de 1946; hasta entonces apenas recuerdan nada interesante de un padre que estaba ausente la mayor parte del tiempo.

Los hijos hablan de tres facetas distintas en su padre, relacionadas con su trabajo, la naturaleza y la música. Entre semana, Heisenberg hablaba poco durante las comidas. Ya sabían que era un gran científico y pensaban que estaba concentrado en sus grandes asuntos —su capacidad de concentración era legendaria—, alejados de la vida cotidiana. Heisenberg intervenía poco en los asuntos domésticos, que estaban a cargo de su esposa. Sin embargo, los fines de semana el padre cambiaba por completo. Las salidas a los bosques y colinas alrededor de Gotinga eran un ritual familiar, y organizaba juegos y contaba historias a sus hijos. Es como si reviviera sus salidas con los exploradores. Heisenberg hablaba poco de su vida pasada, pero a sus hijos les hablaba a menudo, y con un entusiasmo particular, de su época con los exploradores. Todos en la familia eran conscientes de la profunda influencia emocional que este período tuvo para él. Entre las pocas recomendaciones que hizo a sus hijos hubo dos en las que insistió siempre: que se unieran a algún grupo de exploradores para buscar el contacto con la naturaleza y que se animaran a tocar algún instrumento musical.

CONCERTISTA POR UN DÍA



El repertorio para piano de Heisenberg cubría obras para piano solo, o música de cámara con voz o con la intervención de unos pocos instrumentos. Bárbara Blum, una de las hijas de Heisenberg, cuenta que en el sesenta aniversario del científico alemán, su familia y algunos de sus amigos le prepararon un buen regalo: junto con otros amigos y conocidos formaron una efímera orquesta de aficionados para que Heisenberg pudiera tocar uno de sus conciertos favoritos, *el Concierto para piano y orquesta en Re menor* de Mozart. Aquella fue una velada memorable para todos los participantes, y diez años más tarde motivó una sorpresa a un nivel superior: la Orquesta Sinfónica de la Radio de Baviera le propuso tocar juntos el mismo concierto, lo que da una idea de la valoración social de que gozaba Heisenberg. Pero el asunto no quedaba ahí; la sorpresa fue aún mayor cuando le dijeron que tenían la intención de grabar el concierto. A pesar de tan digno ofrecimiento, la iniciativa-homenaje no pasó del primer ensayo, pues Heisenberg se dio cuenta de sus limitaciones como solista profesional. Según cuenta Bárbara, hasta entonces su padre solía saltarse algunas notas en los pasajes más difíciles o frenar el ritmo de ejecución, sin comprometer la musicalidad del conjunto; pero algo perfectamente admisible entre músicos aficionados no lo es cuando se está acompañado de profesionales. Después del ensayo, Heisenberg dijo a los músicos que necesitaba practicar mucho más, pues hasta ese momento no se había dado cuenta de la rapidez con la que dos manos han de tocar simultáneamente el piano. Sin embargo, el director y los miembros de la orquesta apreciaron el arte mostrado por Heisenberg en los pasajes más sutiles, de modo que aquel primer y único ensayo fue una satisfacción para todos.

La música fue para Heisenberg el equivalente a una pasión emocional, y las veladas musicales tuvieron siempre una gran importancia en la familia. En los primeros años de matrimonio, la esposa cantaba *lieder*, acompañada al piano por su marido. Cuando sus dos hijos mayores fueron capaces de hacerlo, solían

tocar tríos para piano, violín y violonchelo con su padre. La música formaba parte de la vida cotidiana: ejercicios o interpretaciones con diversos instrumentos, canciones de un solista o un coro familiar... Una de las hijas decía que en su niñez siempre se dormía arrullada por las escalas y ejercicios de su padre al piano.

La música era un contacto con lo trascendente, como ilustran los siguientes comentarios. En 1924, desde Copenhague, escribía a sus padres:

> Es realmente imposible vivir sin música. A veces, cuando la oímos, llegamos a la absurda idea de que la vida puede tener sentido.

Al final de sus memorias evoca una ocasión en la que escuchó a un amigo y a sus hijos mayores tocar en casa un trío para cuerda:

> A medida que lo escuchaba me reafirmé en la convicción de que, considerando el tiempo a escala humana, siempre seguirán adelante la vida, la música y la ciencia, aunque nosotros solo cooperemos por poco tiempo en ese avance, en el que somos a la vez, en palabras de Niels, espectadores y actores del gran drama de la vida.

EL LEGADO DE HEISENBERG

Como punto final, volvamos a las dos cuestiones suscitadas en la introducción, pero planteadas de manera más general: ¿Cuál es el legado científico de Heisenberg? ¿Qué hay que pensar de su participación en el programa nuclear nazi? Ya se han detallado esas cuestiones, y ahora vamos a hacer una recapitulación.

Empecemos por la segunda cuestión. Sus conceptos sociales y políticos se forjaron durante su infancia y adolescencia. Las ideas de su familia, la Primera Guerra Mundial y la dura posguerra, la fallida República Soviética de Baviera, el movimiento juvenil de los exploradores... fueron las experiencias cruciales en las que se formó su nacionalismo y su actitud ante su país, del que «se sentía parte y responsable» al mismo tiempo, como escribió su

esposa. Su sentido del deber hacia Alemania y la conciencia de ser un científico de primera línea lo llevaron a quedarse en Alemania cuando los nazis accedieron al poder. En ese período, Heisenberg actuó de forma semejante a como lo hiciera Planck después de la Primera Guerra Mundial, para mantener el nivel científico de Alemania como garantía de futuro. En este contexto se sitúa su defensa de la física teórica como elemento fundamental para la formación de los futuros físicos, que a su vez aseguraría lo que hoy llamaríamos «investigación y desarrollo». Se propuso crear lo que denominó *islas de estabilidad*, a costa de concesiones y compromisos con el régimen.

Esta ambigua situación se hizo más complicada a partir de 1939, cuando fue movilizado para participar en el programa nuclear. La visita a Bohr es solo un elemento más a tener en cuenta, pero no sabremos nunca de qué hablaron; sus protagonistas solo pueden hacerlo ahora en obras teatrales. Sin embargo, de esta visita sí que hay algo claro: la incapacidad de Heisenberg para comprender que a los ojos de sus colegas, en Dinamarca o en los otros países que visitó en aquel período, era un representante del ocupante. En la abundante literatura que existe sobre Heisenberg, este ha sido calificado desde héroe resistente a canalla colaborador, pero ya se ha expuesto que la realidad es más compleja y tiene muchos matices. Por lo que se refiere al programa nuclear, no hay ninguna duda de que los científicos participantes, aunque fueran conscientes de las dificultades técnicas, quisieron realmente construir una bomba atómica. Sin embargo, no consiguieron un reactor nuclear operativo, y la decisión de no fabricar la bomba fue tomada por el ministro de Armamento, para optimizar los recursos una vez que llegó a su fin la guerra relámpago. Un elemento importante de esta decisión fue el convencimiento de su superioridad con respecto a los científicos aliados, lo que les llevó a pensar que la bomba no sería relevante para el final de la guerra. Si los científicos alemanes tuvieron o no escrúpulos éticos por su participación en la bomba es algo que no manifestaron hasta su detención en Farm Hall. Cuando Heisenberg dijo que las circunstancias exteriores les evitaron afrontar un dilema ético, se refería a la decisión gubernamental, y no hay en estas palabras nada que indique

cuál era su pensamiento real. En opinión del autor, la parte claramente reprochable de todo este período, sin poco lugar para las dudas, está en la versión elaborada en Farm Hall y sus sucesivas glosas. El tiempo ha mostrado las ocultaciones, disimulos, reinterpretaciones del pasado y medias verdades que contiene.

> «De Sommerfeld aprendí física, y una dosis de optimismo; de Max Born, matemáticas, y Niels Bohr me introdujo en el trasfondo filosófico de los problemas científicos.»
>
> — Heisenberg sobre lo aprendido de sus colegas contemporáneos.

Pasemos ahora a resumir su legado científico. Heisenberg estudió en tres de los centros más importantes en física atómica teórica, con tres de sus líderes mundiales. Estuvo en los lugares y momentos precisos para entrar de lleno en los problemas básicos que dieron origen a una nueva teoría física. Su contribución esencial a la física fue la formulación matricial de la mecánica cuántica.

Empezó con una brillante intuición, verificada primero en ejemplos sencillos y formulada después de manera rigurosa con Born y Jordan. La mayoría de sus posteriores contribuciones fundamentales a la física resultan de aplicar la mecánica cuántica a problemas específicos. Pero el resultado más popular son sus famosas desigualdades que, con cualquiera de los nombres con que se designen, establecen los límites de aplicabilidad de los conceptos clásicos de partícula y de onda.

Resolvió el rompecabezas de las líneas del parahelio y el ortohelio; predijo la existencia de formas análogas en la molécula de hidrógeno, confirmadas por los experimentos; elaboró la teoría cuántica del magnetismo en el hierro y metales semejantes; sentó las bases para describir la estructura de los núcleos atómicos, considerando protones y neutrones como dos aspectos —dos estados cuánticos— de una misma partícula, los nucleones. Estos resultados son consecuencia del llamado *término de intercambio* en la interacción entre partículas, resultado del carácter cuántico de estos sistemas, inexistente en la física clásica. También hizo una contribución destacable en física clásica, con sus estudios

sobre las turbulencias. Aunque no consiguió elaborar una teoría cuántica de campos, sus trabajos iniciales ayudaron a establecer sus bases; tampoco logró unificar las interacciones entre partículas elementales.

Heisenberg tenía una intuición especial para captar los puntos esenciales de los problemas que consideraba, y para inventar nuevos modos de enfocarlos. Casi todas sus propuestas contienen ideas seminales que han abierto nuevas vías. Su nombre aparece en libros de texto que se refieren a una variedad de campos: mecánica cuántica, física atómica, física molecular, materia condensada, física nuclear, teoría cuántica de campos, partículas elementales, hidrodinámica... No hay duda de que, por todas sus aportaciones, se le puede calificar de físico genial.

Lecturas recomendadas

BOHR, N., *La teoría atómica y la descripción de la naturaleza*, Madrid, Alianza Universidad, 1988.

FERNÁNDEZ-RAÑADA, A., *Ciencia, incertidumbre y conciencia. Heisenberg*, Madrid, Nivola, 2004.

FRAYN, M., *Copenhague*, Madrid, Centro Cultural de la Villa de Madrid, 2003.

FRISCH, O., *De la fisión del átomo a la bomba de hidrógeno*, Madrid, Alianza Editorial, 1982.

HEISENBERG, W., *Diálogos sobre la física atómica*, Madrid, BAC, 1972.

—: *La imagen de la naturaleza en la física*, Barcelona, Seix-Barral, 1967.

LAPIEDRA, R., *Las carencias de la realidad*, Barcelona, Tusquets, 2008.

SÁNCHEZ RON, J.M., *Historia de la física cuántica*, Barcelona, Crítica, 2001.

Índice

Balmer, Johann 24, 25
BKS, modelo 71
Bohr, Niels 7, 11, 13, 33, 48-63, 70-73, 79, 82, 87, 92, 93, 97, 98, 100-106, 113, 116, 120, 126, 133, 135, 136, 144-147, 161, 168, 169
    modelo de 48, 50, 51, 53-56, 60
Born, Max 13, 58-65, 69, 70-72, 76-79, 82-86, 97, 105, 123-126, 166, 169
Broglie, Louis de 31, 80, 98
    relación de 31, 98

CERN 13, 159
Club del Uranio 138-144
Copenhague, interpretación de 49, 102, 103, 105
cuerpo negro 9, 26-29, 138

Dirac, Paul 79, 83, 118, 120, 126, 161
dualidad onda-partícula 30, 31, 80, 97, 98, 100, 104, 108

efecto
    Stark 58
    Zeeman 53, 54, 56, 57, 64, 87

Einstein, Albert 8, 9, 28-31, 34, 39, 40, 45, 49, 57, 61, 62, 71, 79, 82, 104, 122, 125, 127-130, 141, 162
electrodinámica cuántica 118, 120, 163
espectro atómico 21, 22-23, 24, 33, 41, 44, 48, 52, 65, 70, 88
espín 56, 57, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 114, 117, 118, 148
estructura fina 50-52
    constante de 51, 53
    espectros 51

ferromagnetismo 109, 112, 118
fisión nuclear 131, 133, 134, 136, 139, 141, 143, 146, 148, 152
Fourier, serie de 75
Frisch, Otto 135, 136
función de ondas 81, 84, 86, 88, 89, 90, 91, 103, 108, 114, 124

helio, átomo 63, 88, 90, 91, 114, 118
hidrógeno
    átomo 24, 50, 51, 53, 60, 63, 73, 79, 80, 81, 84, 115, 116, 118
    molécula 60, 91, 116, 169

imprecisión 100, 106-108
incertidumbre 92-97, 105-108
indeterminación 67, 93, 94, 97, 98, 104, 106, 108
isospín 117

Jordan, Pascual 13, 77, 79, 82, 83, 97, 118, 123, 126, 169

Kirchhoff, Gustav 23, 26, 29

Laue, Max von 124, 125, 128, 146, 148, 149, 151, 160
Lenard, Philipp 28, 123, 127, 128
Los Álamos 49, 152, 154

matriz 77, 78, 79, 82, 97
  S 145
mecánica
  matricial 79, 82, 84, 93, 123, 128
  ondulatoria 80, 82, 84, 93, 128
Meitner, Lise 134-136
microscopio 65, 97, 98, 99, 100
  de Heisenberg 98
momento 31, 50, 55, 56, 71, 77, 87, 88, 95-101, 104, 108, 120, 145

núcleo atómico 48, 56, 87, 89, 115
nucleón 117, 118, 121, 135, 169
número cuántico
  magnético 54
  principal 50, 51, 53

ortohelio 88, 91, 114, 169

paquete de ondas 84, 94
parahelio 88, 91, 114, 169
partículas y ondas 30
Pauli, Wolfgang 38, 45, 47, 56, 57, 60, 62, 63, 73, 79, 81, 82, 85-87, 89-91, 105, 113, 114, 116, 118, 119, 164
Planck, Max 8, 13, 26-29, 31, 33, 43, 48, 50, 51, 53, 56, 77, 81, 95-97, 108, 123, 124, 125, 128, 134, 146, 158, 159, 168
posición 74, 76, 77, 86, 93, 96, 97, 98, 100, 101, 104, 108, 114, 135
probabilidades cuánticas 84, 86, 103, 108, 122

rayos cósmicos 119, 120, 121
«rumpf», modelo 57, 58, 62, 70, 86, 87
Rutherford, Ernest 32, 92, 115, 116

Schrödinger, Erwin 73, 80, 81, 82, 84, 86, 92, 123, 126, 128
  ecuación de 82
Sociedad
  Káiser Wilhelm 158
  Max Planck 29, 158
Sommerfeld, Arnold 45
Stark, Johannes 58, 123-125, 127-129

términos espectrales 54, 88

uranio 117, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 142, 143, 146
Uranverein (*véase* Club del Uranio)

Weizsäcker, Carl von 92, 111, 123, 126, 139, 140, 144, 146-151, 160
Wien, Wilhelm 46, 48, 63-65, 84